



TUGAS AKHIR -MO 141326

**ANALISA PENGARUH TEGANGAN SISA DAN
PERUBAHAN DISTORSI PADA PENGELASAN
STRUKTUR *PRESSURE VESSELS* PT. PETROKIMIA
GRESIK DENGAN VARIASI WELDING SEQUENCE
DENGAN MENGGUNAKAN METODE ELEMEN
HINGGA**

BAYU IMAN FATKUROKHIM

NRP. 4313 100 090

Dosen Pembimbing 1 :
Nur Syahroni, S.T., M.T.,Ph. D.

Dosen Pembimbing 2 :
Ir. Handayanu, M.Sc.,Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK KELAUTAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2017



FINAL PROJECT -MO 141326

**ANALYSIS OF RESIDUAL STRESS EFFECT AND
DISTORTION ON WELDING STRUCTURE OF
PRESSURE VESSELS PT. PETROKIMIA GRESIK
WITH WELDING SEQUENCE USING FINITE
ELEMENT METHOD**

BAYU IMAN FATKUROKHIM

NRP. 4313 100 090

Supervisor 1:

Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph. D.

Supervisor 2:

Ir. Handayanu, M.Sc., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK KELAUTAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA

2017

**ANALISA TEGANGAN SISA DAN PERUBAHAN DISTORSI PADA
PENGELASAN STRUKTUR *PRESSURE VESSELS* PT. PETROKIMIA
GRESIK DENGAN VARIASI *WELDING SEQUENCE* DENGAN
MENGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA**

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada Program Studi S-1 Departemen Teknik Kelautan Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

BAYU IMAN FATKUROKHIM

NRP. 4313 100 090

Disetujui oleh:

1. Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D.

(Pembimbing 1)

2. Ir. Handayanu, M.Sc., Ph.D.

(Pembimbing 2)

3. Dr. Eng. Yeyes Mulyadi, S.T., M.Sc.

(Penguji 1)

4. Ir. Imam Rochani, M.Sc.

(Penguji 2)

SURABAYA, JULI 2017

(halaman sengaja dikosongkan)

**ANALISA PENGARUH TEGANGAN SISA DAN PERUBAHAN DISTORSI
PADA PENGELASAN STRUKTUR *PRESSURE VESSELS* PT.
PETROKIMIA GRESIK DENGAN VARIASI WELDING SEQUENCE
DENGAN MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA**

Nama Mahasiswa : Bayu Iman Fatkurokhim
NRP : 4313100090
Departemen : Teknik Kelautan – FTK ITS
Dosen Pembimbing : Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D
Ir. Handayanu, M.Sc., Ph.D.

ABSTRAK

Perkembangan teknologi industri migas sudah sangat maju, salah satu penerapan yang dilakukan adalah penyambungan bahan-bahan material untuk menunjang fasilitas industri migas. Tegangan sisa dapat terjadi karena adanya perbedaan temperatur yang tinggi akibat pengelasan dan juga distribusi panas yang tidak merata.. Hal tersebut menyebabkan material menjadi keras tetapi rapuh (getas) sehingga dapat menyebabkan kegagalan struktur pada daerah sambungan tersebut. Dalam tugas akhir ini akan dilakukan simulasi pengelasan struktur *pressure vessels* untuk mengetahui tegangan sisa yang terjadi serta pengaruh *Post Weld Heat Treatment* terhadap tegangan sisa itu sendiri. Material yang digunakan yaitu aluminium serta data WPS yang berasal dari perusahaan fabrikator. Simulasi terbagi dalam 2 langkah yaitu analisa thermal dan struktural. Nilai dari tegangan sisa dari *pathline* 1 hingga *pathline* 3 adalah 189 MPa, 124,8 MPa, 100,76 MPa, dengan nilai distorsi sebesar 40,43 mm. Kemudian dilakukan analisa *Post Weld Heat Treatment* yang mengacu pada AWS D1.1:2000 untuk mengurangi tegangan sisa yang terjadi. Dari hasil *Post Weld Heat Treatment* tersebut nilai dari tegangan sisa dapat diturunkan secara signifikan. Setelah diberi perlakuan *Post Weld Heat Treatment* dengan variasi suhu sebesar 200 C, 300 C pengurangan tegangan sisa maksimal terbesar terjadi pada *pathline* 1 hingga *pathline* 3 sebesar 125 MPa, 93 Mpa, 100 MPa.

Kata Kunci : *Pressure vessels*, tegangan sisa, distorsi, *post weld heat treatment*, *pathline*

(halaman sengaja dikosongkan)

**ANALYSIS OF RESIDUAL STRESS EFFECT AND DISTORTION ON
WELDING STRUCTURE OF PRESSURE VESSELS PT. PETROKIMIA
GRESIK WITH WELDING SEQUENCE USING FINITE ELEMENT
METHOD**

Name : Bayu Iman Fatkurokhim
REG. : 4313100090
Department : Ocean Engineering FTK-ITS
Supervisors : Nur Syahroni, S.T., MT., Ph.D
Ir. Handayanu, M.Sc., Ph.D.

ABSTRACT

The technological developments of the oil and gas industry have been very advanced, one of the implementation is materials grafting to support oil and gas industry facilities. Residual stress may occur due to high temperature differences as a result of welding and also uneven heat distribution. The rapid cooling rates also changed the micro-structure in the weld and HAZ areas. This causes the materials become hard but crumbly with the result that give rise to structural failure in the area of the connection. In this final project, the welding pressure vessels structure will be simulated to know the residual stress that happened and the influence of Post Weld Heat Treatment to the residual stress itself. The material that used in this simulation are aluminum and WPS data coming from the fabrication company. The simulation is divided into 2 steps: thermal and structural analysis. The value of the residual stress in pathline 1 to pathline 3 is 189 MPa, 124,8 MPa, 100,76 MPa with the total deformation is 40,43 mm. Then performed a Post Weld Heat Treatment analysis which refers to AWS D1.1: 2000 to reduce residual stresses. From the results of Post Weld Heat Treatment, the value of residual stress can be derived significantly.. After being treated using Post Weld Heat Treatment with temperature variations of 200 C, 300 C the value of the residual stress in pathline 1 to pathline 3 is 125 MPa, 93 Mpa, 100 MPa.

Keywords : Pressure vessels, residual stress, distortion, post weld heat treatment, pathline.

(halaman sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Puji syukur Alhamdulillah penulis ucapkan kepada Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan karuniaNya sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan akhir Tugas Akhir dengan judul “Analisa Pengaruh Tegangan Sisa dan Perubahan Distorsi Pada Pengelasan Struktur *Pressure Vessels* PT. Petrokimia Gresik dengan Variasi *Welding Sequence* dengan Metode Elemen Hingga”.

Tugas Akhir ini merupakan salah satu syarat dalam menyelesaikan Studi Kesarjanaan (S-1) di Jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Tugas Akhir ini membahas tentang analisa tegangan sisa dan distorsi dengan pengaruh Post Weld Heat Treatment.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan dari laporan ini, baik dari materi maupun teknik penyajiannya mengingat kurangnya pengetahuan dan pengalaman penulis. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan.

Untuk itu semoga dalam laporan Tugas Akhir ini dapat bermanfaat dan juga dapat menambah ilmu pengetahuan yang terkait bagi para pembaca.

Surabaya, 2017

Bayu Iman Fatkurokhim

(halaman sengaja dikosongkan)

UCAPAN TERIMAKASIH

Pada kesempatan kali ini, Penulis menyampaikan terimakasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam menyelesaikan Tugas akhir ini baik dukungan secara moril dan materi, diantaranya kepada :

1. Allah SWT atas semua keberkahan dan kemudahan dalam mengerjakan dan menyelesaikan Tugas Akhir ini.
2. Kedua Orang tua penulis yang secara tulus ikhlas memberikan doa dan dukungan sehingga Tugas Akhir ini dapat selesai dengan lancar.
3. Bapak Nur Syahroni S.T.,M.T.,Ph.D selaku dosen pembimbing I yang telah memberikan ilmu dan pebimbingan dalam penyelesaian Tugas Akhir
4. Bapak Ir. Handayanu., M.Sc., Ph.D. selaku dosen pembimbing II yang telah memberikan ilmu dan pebimbingan dalam penyelesaian Tugas Akhir
5. Bapak Yoyok Setyo Hadiwidodo S.T., M.T., Ph.D., selaku dosen wali selama masa perkuliahan di ITS – Surabaya
6. Bapak-bapak dosen penguji selama proses sidang proposal sampai sidang akhir berlangsung.
7. Karyawan Tata Usaha Jurusan Teknik Kelautan ITS atas bantuan administrasi yang diberikan kepada penulis.
8. Teman-teman Tugas Akhir bimbingan Bapak Nur Syahroni S.T.,M.T.,Ph.D baik periode sekarang maupun semester lalu.
9. Teman-teman ruangan puslit kelautan ITS atas kerjasamanya dalam pengerjaan tugas akhir ini hingga dapat terselesaikan.
10. Teman-teman sejawat angkatan 2013 (Valtameri) Teknik Kelautan ITS

Ucapan terima kasih juga saya sampaikan kepada seluruh pihak yang secara langsung maupun tak langsung turut membantu dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vii
KATA PENGANTAR	ix
UCAPAN TERIMA KASIH	xi
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR TABEL	xvi
DAFTAR LAMPIRAN	xvii
BAB I	1
PENDAHULUAN	1
1.1. LATAR BELAKANG MASALAH	1
1.2. PERUMUSAN MASALAH	2
1.3. TUJUAN	3
1.4. MANFAAT	3
1.5. BATASAN MASALAH	3
1.6. SISTEMATIKA PENULISAN	4
BAB II	6
TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	6
2.1. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.2. DASAR TEORI	7
2.2.1. BEJANA TEKAN (PRESSURE VESSELS)	7
2.2.2. ALUMINIUM	8
2.2.3. GMAW (GAS METAL ARC WELDING)	8
2.2.5. DEFORMASI PADA PENGELASAN	12
2.2.5. POST WELD HEAT TREATMENT (PWHT)	15
2.2.6. METODE ELEMEN HINGGA	19
BAB III	26
METODOLOGI PENELITIAN	26
3.1. SKEMA DIAGRAM ALIR	26
3.2. PENJELASAN DIAGRAM ALIR	27
3.3. DIAGRAM ALIR ANALISA THERMAL DAN STRUKTURAL	30

BAB IV	35
ANALISA DAN PEMBAHASAN	35
4.1. PERMODELAN STRUKTUR	35
4.2. MESHING	36
4.3 URUTAN PENGELASAN.....	37
4.4 PERHITUNGAN BEBAN HEAT FLUX	37
4.5 HASIL ANALISA THERMAL.....	41
4.5.1 DISTRIBUSI PANAS.....	42
4.5.2 HASIL ANALISA TEGANGAN SISA.....	43
4.5.2.1 DISTRIBUSI TEGANGAN SISA PADA PATHLINE 1	43
4.5.2.2 DISTRIBUSI TEGANGAN SISA PADA PATHLINE 2	44
4.5.2.3 DISTRIBUSI TEGANGAN SISA PADA PATHLINE 3	45
4.7 ANALISA TOTAL DEFORMASI.....	45
4.6 ANALISA TEGANGAN SISA SETELAH POST WELD HEAT TREATMENT	46
BAB V.....	49
PENUTUP.....	49
5.1 KESIMPULAN.....	49
5.2 SARAN	50
DAFTAR PUSTAKA	50

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Struktur Bejana Tekan (<i>Pressure Vessels</i>) PT. Petrokimia Gresik	8
Gambar 2. 2 Pengelasan GMAW.....	9
Gambar 2. 3 Ilustrasi Terbentuknya Tegangan Sisa (Wiryosumarto,1994).....	10
Gambar 2. 4 Distribusi Tegangan Sisa pada Sambungan Las Tumpul (Wiryosumarto,1994).....	11
Gambar 2. 5 Hubungan antara Tegangan Sisa dan Distorsi (Syahroni dan Hidayat, 2012)	13
Gambar 2. 6 Macam-macam distorsi dalam pengelasan (Wiryosumarto,1994)... ..	14
Gambar 2. 7 Tiga Perubahan Dasar Selama Proses Pengelasan (Syahroni dan Hidayat, 2012).....	15
Gambar 2. 8 <i>Heating Treatment Diagram</i> (Total E&P Indoensie 2011).....	18
Gambar 2. 9 Contoh Meshing Pada Struktur Bejana Tekan	20
Gambar 2. 10 Geometri Elemen Shell 131	21
Gambar 2. 11 Geometri Elemen Shell 132	21
 Gambar 3. 1 Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir.....	26
Gambar 3. 2 Diagram Alir Analisa Thermal.....	30
Gambar 3. 3 Diagram Alir Analisa Struktural	32
 Gambar 4. 1 Model Geometri Struktur <i>Pressure Vessels</i>	36
Gambar 4. 2 Bentuk Meshing dari Struktur <i>Pressure Vessels</i>	36
Gambar 4. 3 Urutan Simulasi Pengelasan Pada Struktur <i>Pressure Vessels</i>	37
Gambar 4. 4 Hasil Analisa Thermal pada Struktur <i>Pressure Vessels</i> dengan ANSYS Workbench 16.0	42
Gambar 4. 5 Distribusi Temperatur pada Setiap Titik Pengelasan	43
Gambar 4. 6 Pathline Untuk Pembacaan Tegangan Sisa	43
Gambar 4. 7 Tegangan yang Terjadi Pada Struktur <i>Pressure Vessels</i> pada <i>Pathline</i> 1.....	44
Gambar 4. 8 Tegangan yang Terjadi Pada Struktur <i>Pressure Vessels</i> pada <i>Pathline</i> 2.....	45
Gambar 4. 9 Tegangan yang Terjadi Pada Struktur <i>Pressure Vessels</i> pada <i>Pathline</i> 3.....	45
Gambar 4. 10 Total Deformasi yang Terjadi Pada Struktur	46
Gambar 4. 11 Gambar Distribusi Grafik Perbandingan Tegangan Sisa Setelah PWHT Pada <i>Pathline</i> 1.....	47
Gambar 4. 12 Gambar Distribusi Grafik Perbandingan Tegangan Sisa Setelah PWHT Pada <i>Pathline</i> 2.....	48

Gambar 4. 13 Gambar Distribusi Grafik Perbandingan Tegangan Sisa Setelah PWHT Pada Pathline 3.....	48
--	----

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 <i>Minimum Holding Time</i>	17
Tabel 2. 2 <i>Alternate Stress-Relief Heat Treatment</i>	17
Tabel 4. 1 Ukuran Geometri Struktur <i>Pressure Vessels</i>	35
Tabel 4. 2 Variasi Suhu dan Waktu Tahan <i>Post Weld Heat Treatment</i>	47

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN A

DATA DATA YANG DIGUNAKAN SELAMA Pengerjaan Tugas Akhir

LAMPIRAN B

PROSES Pengerjaan Analisa Thermal dengan Software ANSYS WORKBENCH 16.0

LAMPIRAN C

PROSES Pengerjaan Analisa Struktural dengan Software ANSYS WORKBENCH 16.0

(halaman sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. LATAR BELAKANG MASALAH

Pengelasan banyak digunakan dalam berbagai bidang manufaktur dan industri, terutama dalam bidang perkapalan dan industri maritim. Berdasarkan definisi dari DIN (*Deutsche Industrie Normen*) las adalah ikatan metalurgi pada sambungan logam atau logam paduan yang dilakukan dalam keadaan lumer atau cair. Dari definisi tersebut (Wiryosumarto, 1994) dalam bukunya yang berjudul Teknologi Pengelasan Logam menjabarkan lebih lanjut bahwa las adalah sambungan setempat dari beberapa logam dengan menggunakan energi panas.

Pada saat pengelasan, sumber panas berjalan terus dan menyebabkan perbedaan distribusi temperatur pada logam sehingga terjadi pemuaian dan penyusutan yang tidak merata. Adanya pemanasan lokal akibat pengelasan dan pendinginan yang cepat atau perubahan suhu yang tinggi menyebabkan energi yang tersimpan pada daerah lasan juga tinggi sehingga terjadi tegangan sisa dan distorsi.

Tegangan sisa adalah tegangan yang bekerja pada bahan tanpa adanya gaya-gaya luar yang bekerja pada bahan tersebut. Tegangan sisa ditimbulkan karena adanya deformasi plastis yang tidak seragam dalam bahan, antara lain akibat perlakuan panas yang tidak merata atau perbedaan laju pendinginan pada bahan yang mengalami proses pengelasan. Tegangan sisa yang tinggi pada daerah lasan mengakibatkan menurunnya kekuatan tekuk, kekuatan las, dan *fatigue life* (Wiryosumarto, 1994).

Pada konstruksi las yang dibiarkan bebas bergerak (tanpa mendapat gaya atau beban luar), regangan termal yang tersisa setelah suhu lasan mencapai temperatur kamar (mendingin) disebut sebagai distorsi las. Distorsi adalah perubahan bentuk atau penyimpangan bentuk yang diakibatkan oleh panas, yang diantaranya adalah akibat proses pengelasan. Pemuaian dan penyusutan benda kerja akan berakibat melengkungnya atau tertariknya bagian-bagian benda kerja sekitar pengelasan, misalnya pada saat proses las busur manual. Distorsi pada logam induk akan mengurangi kekuatan tekuk. Perubahan ini juga akan sangat berpengaruh terhadap keandalan struktur.

Tegangan sisa dan distorsi merupakan hal yang tidak dapat dihindarkan dalam proses pengelasan. Oleh karena itu, hal ini merupakan tantangan terbesar untuk praktisi pengelasan. Walaupun tegangan sisa dan distorsi tidak dapat dihindarkan, namun fenomena tersebut dapat diminimalisasi dengan cara mengurangi besarnya masukan panas, pemberian *heat treatment*, memperkecil sudut kampuh las, dan menentukan urutan pengelasan yang baik.

Besar dan distribusi dari tegangan sisa dan distorsi dipengaruhi oleh banyak faktor termasuk geometri, sifat material, dan prosedur pengelasan. Meskipun tegangan sisa dan distorsi dapat diukur secara eksperimen menggunakan perangkat laser, difraksi sinar x-ray, difraksi neutron dan metode sectioning. Tetapi metode tersebut memakan waktu dan akurasi pengukuran sering bergantung pada presisi dari perangkat dan prosedur pengukuran. Sebagai alternatif untuk metode eksperimental, metode elemen hingga dapat digunakan untuk memprediksi tegangan sisa dan distorsi pada bidang 3 dimensi yang dilas.

Dalam tugas akhir ini, akan dilakukan simulasi numerik untuk mengurangi besarnya tegangan sisa dan distorsi pada struktur *pressure vessels* milik PT. Petrokimia Gresik dengan memvariasikan urutan pengelasannya. Penelitian ini tidak dilakukan secara eksperimental tetapi menggunakan metode elemen hingga untuk menentukan besarnya tegangan sisa dan distorsi.

1.2. PERUMUSAN MASALAH

Dari latar belakang masalah di atas, perumusan masalah yang akan diselesaikan dalam tugas akhir ini adalah:

1. Bagaimana tegangan sisa dan distorsi akibat pengelasan pada struktur *pressure vessels*?
2. Bagaimana pengaruh post weld heat treatment terhadap tegangan sisa dan distorsi pada pengelasan struktur *pressure vessels* setelah proses pengelasan?

1.3. TUJUAN

Adapun tujuan yang akan dicapai penulis dalam melakukan tugas akhir ini adalah:

1. Mendapatkan besarnya tegangan sisa dan distorsi yang terjadi pada struktur *pressure vessels* setelah proses pengelasan.
2. Mendapatkan hasil pengaruh *post weld heat treatment* pada tegangan sisa dan distorsi pada pengelasan struktur *pressure vessels*.

1.4. MANFAAT

Manfaat dari penelitian ini adalah dapat memberikan pengetahuan tentang pengaruh urutan pengelasan yang akan digunakan pada pengelasan struktur *pressure vessels* sehingga bisa dijadikan pertimbangan dan acuan dalam pengelasan yang tepat untuk meminimalkan distorsi dan/atau tegangan sisa yang terjadi, sehingga dihasilkan pengelasan yang baik.

1.5. BATASAN MASALAH

Agar ruang lingkup tugas akhir ini tidak melebar maka perlu adanya batasan-batasan sebagai berikut:

1. Pengelasan dilakukan dengan metode las GMAW (*Gas Metal Arc Welding*).
2. Material yang digunakan adalah aluminium.
3. Elemen hingga yang dipakai adalah elemen *shell*.
4. Selama proses pengelasan diasumsikan tidak terdapat cacat.
5. *Metal Filler* tidak dimodelkan.
6. Efek radiasi pengelasan diabaikan.
7. Bagian dari *support* struktur *pressure vessels* dianggap telah dilas.

1.6. SISTEMATIKA PENULISAN

Sistematika penulisan dalam penyusunan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini menjelaskan tentang latar belakang penelitian yang akan dilakukan, perumusan masalah, tujuan yang hendak dicapai dalam penulisan tugas akhir, manfaat yang diperoleh, serta ruang lingkup penelitian untuk membatasi analisis yang dilakukan dalam tugas akhir.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

Bab ini berisi referensi dan juga teori-teori pendukung yang digunakan sebagai acuan atau pedoman dalam menyelesaikan tugas akhir. Referensi tersebut bersumber pada jurnal lokal maupun internasional, literatur, rules/code dan juga buku yang berkaitan dengan topik yang dibahas.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini berisi tentang alur pengerjaan tugas akhir dengan tujuan untuk memecahkan masalah yang diangkat dalam bentuk diagram alir atau flow chart yang disusun secara sistematis yang dilengkapi pula dengan data data penelitian serta penjelasan detail untuk setiap langkah pengerjaannya.

BAB IV ANALISIS HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menjelaskan tentang pengolahan data yang diperoleh, kemudian pemodelan struktur menggunakan *software* ANSYS 16.0. Selanjutnya, dalam bab ini juga dilakukan pembahasan dan pengolahan output yang diperoleh dari running software secara termal yang mencakup analisis distribusi panas lalu diubah ke tegangan panas dan tegangan struktur.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisi kesimpulan yang merupakan uraian singkat dari keseluruhan hasil analisis. Uraian singkat ini diharapkan bisa menjawab rumusan masalah yang ada pada Bab I. Pada bab ini juga berisikan saran yang bermanfaat guna keberlanjutan penelitian terkait kedepannya.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1. TINJAUAN PUSTAKA

Selama proses pengelasan, bagian yang dilas menerima panas pengelasan setempat atau terlokalisir di sekitar titik pengelasan dan selama proses berjalan suhunya berubah terus sehingga distribusi suhu tidak merata. Karena panas tersebut, maka pada bagian yang dilas terjadi pengembangan termal, sedangkan bagian yang dingin tidak berubah sehingga terbentuk tegangan sisa karena proses panas las tidak merata. [Wiryosumarto, 1996]. Kualitas hasil las yang kuat dan keras bergantung pada besarnya butiran kristal.

yang diperoleh saat pengelasan, butiran logam yang kecil dan halus membutuhkan pengaturan pemanasan dan pendinginan yang biasa disebut perlakuan panas. Secara garis besar tujuannya adalah untuk mengubah mikrostruktur bahan dan menghilangkan tegangan dalam agar memperoleh sifat-sifat tertentu seperti kekerasan dan kekuatan yang terbaik untuk memenuhi kebutuhan yang diperlukan [Alip, 1989]. Perlakuan panas pada material dapat dilakukan dengan pemanasan mula (preheat), pemanasan saat pengelasan, dan pemanasan setelah pengelasan (postheat) yang akan mempengaruhi sifat-sifat mekanis, bentuk, dan susunan butiran kristal serta kualitas dari sambungan las [Suharto, 1991]. Distorsi dapat dikurangi dengan membatasi masukan panas saat pengelasan berlangsung. Masukan panas pada pengelasan pelat datar dipengaruhi oleh volume deposit logam las. Volume deposit logam pengisi dipengaruhi tebal pelat dan bentuk kampuh. Beberapa peneliti menggunakan bentuk kampuh U dan V ganda untuk meminimalkan volume logam pengisi. Pengelasan pelat datar sering menggunakan single layer dan multi layer. Pengelasan single layer sering digunakan untuk pelat tipis. Dan pengelasan multi layer digunakan untuk pelat yang tebal. Pengelasan multi layer sering digunakan untuk konstruksi dengan keuletan sambungan yang tinggi. Pada pengelasan multilayer, layer kedua akan memberikan efek postheat pada layer sebelumnya dan preheat bagi layer sesudahnya. Pengelasan multi layer juga akan memberikan efek tempering pada daerah HAZ, akibat panas dari layer

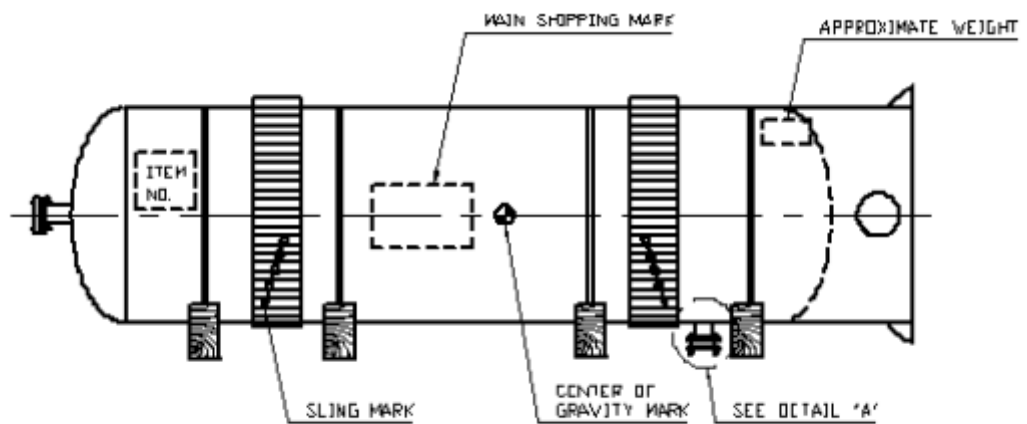
berikutnya. Efek preheat dan tempering dapat mempengaruhi struktur mikro dan kekerasan pada hasil las.

Besar dan distribusi dari tegangan sisa dan distorsi dipengaruhi oleh banyak faktor termasuk geometri, sifat material, dan prosedur pengelasan. Meskipun tegangan sisa dan distorsi dapat diukur secara eksperimen menggunakan perangkat laser, difraksi sinar x-ray, difraksi neutron dan metode sectioning. Tetapi metode tersebut memakan waktu dan akurasi pengukuran sering bergantung pada presisi dari perangkat dan prosedur pengukuran. Sebagai alternatif untuk metode eksperimental, metode elemen hingga dapat digunakan untuk memprediksi tegangan sisa dan distorsi pada bidang 3 dimensi yang dilas.

2.2. DASAR TEORI

2.2.1. BEJANA TEKAN (*PRESSURE VESSELS*)

Bejana tekan (*pressure vessel*) merupakan wadah tertutup yang digunakan untuk berbagai macam keperluan dalam dunia industri maupun dalam kehidupan sehari-hari. Bejana tekan dirancang untuk mampu menampung cairan atau gas yang memiliki temperatur atau tekanan yang berbeda dari keadaan lingkungannya. Berdasarkan ukuran tebal dindingnya, bejana tekan terbagi menjadi dua yaitu bejana tekan berdinding tipis dan bejana tekan berdinding tebal. Bejana tekan termasuk berdinding tipis ketika perbandingan tebal dibanding jari-jarinya dibawah 1:10, sedangkan jika diatas perbandingan tersebut maka bejana tekan termasuk berdinding tebal. Perbedaan bejana tekan berdinding tipis dan tebal terletak pada tegangan yang terjadi ada dinding bejana, pada bejana tekan berdinding tipis tegangan diperhitungkan hanya pada arah circumferensial dan longitudinal, sedangkan bejana berdinding tebal, tegangan kearah radial juga diperhitungkan. Namun, bejana tekan berdinding tipis bukan berarti tidak mempunyai tegangan kearah radial, tetapi perbedaan tegangan radial antara dinding sebelah dalam dan luar tidak terlalu kentara, sehingga diasumsikan sama, sedangkan bejana tekan berdinding tebal distribusi tegangan kearah radial sangat jelas, sebab dinding yang begitu tebal, maka dari itu perlu untuk diperhitungkan tegangan kearah radialnya. Pada Gambar 2.1 dapat dilihat struktur bejana tekan milik PT. Petrokimia Gresik.



Gambar 2.1 Struktur Bejana Tekan (*Pressure Vessels*) PT. Petrokimia Gresik

2.2.2 ALUMINIUM

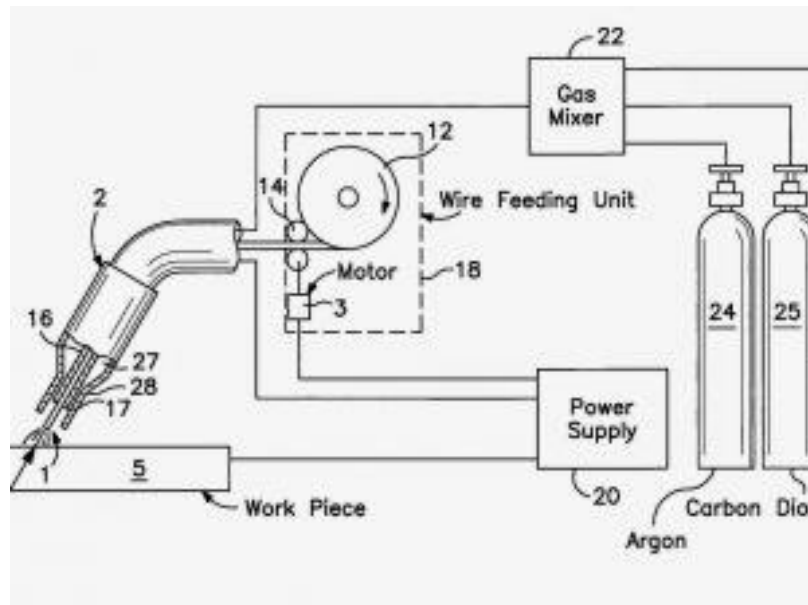
Aluminium merupakan material terbanyak ketiga setelah oksigen dan silikon. Aluminium merupakan logam yang banyak digunakan dalam industri otomotif dunia. Sifat utama aluminium yaitu ringan, titik lebur yang rendah dan ketahanan korosi yang baik merupakan penyebab sering digunakannya material ini dalam industri di dunia. Aluminium menunjukkan performa yang baik untuk diaplikasikan secara mekanik maupun elektrik. Aluminium merupakan logam yang rapat jenisnya rendah, sehingga dapat dipadu dengan dengan berbagai jenis logam yang lainnya. Nilai titik lebur pada material aluminium ini adalah 660 C.

2.2.3 GMAW (*GAS METAL ARC WELDING*)

GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) merupakan proses penyambungan dua buah logam atau lebih yang sejenis dengan menggunakan bahan tambah yang berupa kawat gulungan dan gas pelindung melalui proses pencairan. Gas pelindung dalam proses pengelasan ini berfungsi sebagai pelindung dari proses oksidasi, yaitu pengaruh udara luar yang dapat mempengaruhi kualitas las. Gas yang digunakan dalam proses pengelasan ini dapat menggunakan gas argon, helium, argon+helium dsb. Penggunaan gas juga dapat mempengaruhi kualitas la itu sendiri.

Proses pengelasan GMAW merupakan pengelasan dengan proses pencairan logam. Proses pencairan logam ini terbentuk karena adanya busur las yang terbentuk diantara kawat las dengan benda kerja. Ketika kawat las didekatkan

dengan benda kerja maka terjadilah busur las (menghasilkan panas) yang mampu mencairkan kedua logam tersebut (kawat las + benda kerja), sehingga akan mencair bersamaan dan akan membentuk suatu sambungan yang tetap. Dalam proses ini gas pelindung yang berupa gas akan melindungi las dari udara luar hingga terbentuk suatu sambungan yang tetap. Pada Gambar 2.2 dapat dilihat proses pengelasan GMAW.



Gambar 2.2 Pengelasan GMAW

2.2.4. TEGANGAN SISA (*RESIDUAL STRESS*)

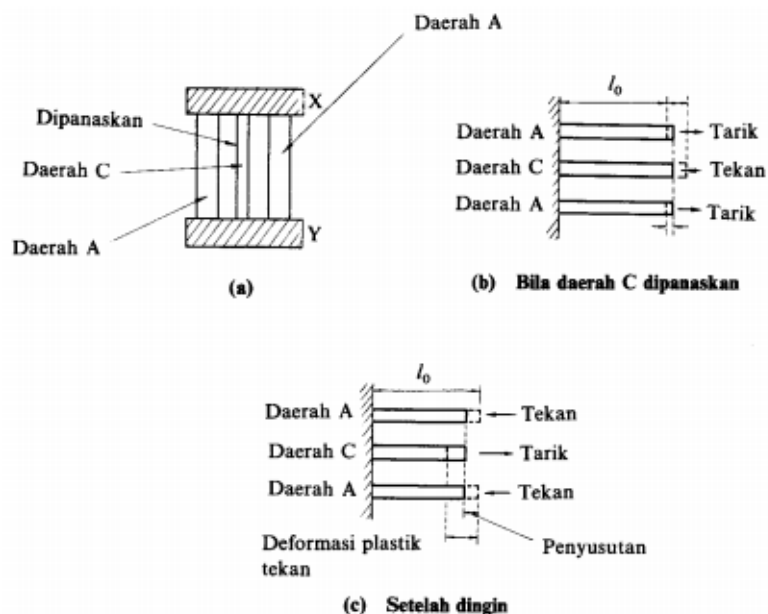
Tegangan sisa selalu muncul apabila sebuah material dikenai perubahan temperatur *non-uniform*, tegangan-tegangan ini disebut tegangan panas. Faktor-faktor yang mempengaruhi pembentukan tegangan sisa adalah batas transformasi dan batas luluh beban, temperatur pemanasan tertinggi, kecepatan pendinginan, tahanan luar, dan pemanasan awal. Ketika material dipanasi secara merata, akan terjadi tegangan. Tegangan sisa juga akan terjadi ketika regangan yang didistribusikan tidak merata seperti regangan plastis.

Tegangan sisa timbul karena adanya perbedaan temperatur yang besar sedangkan distorsi terjadi jika logam las dibiarkan bergerak leluasa selama proses pendinginan. Tegangan sisa yang terjadi pada kampuh las ini dapat menyebabkan kegagalan yang mana dapat mengurangi kekuatan dari struktur dan komponen.

Oleh karena itu, tegangan sisa dalam pengelasan harus dikurangi sampai sekecil mungkin untuk mencegah kegagalan desain suatu komponen dengan mengerti mekanisme terjadinya tegangan sisa dapat dipelajari untuk mengambil langkah-langkah meminimalisasikan tegangan sisa yang terjadi pada saat pengelasan (Setyawati 2010).

A. Proses Terjadinya Tegangan Sisa

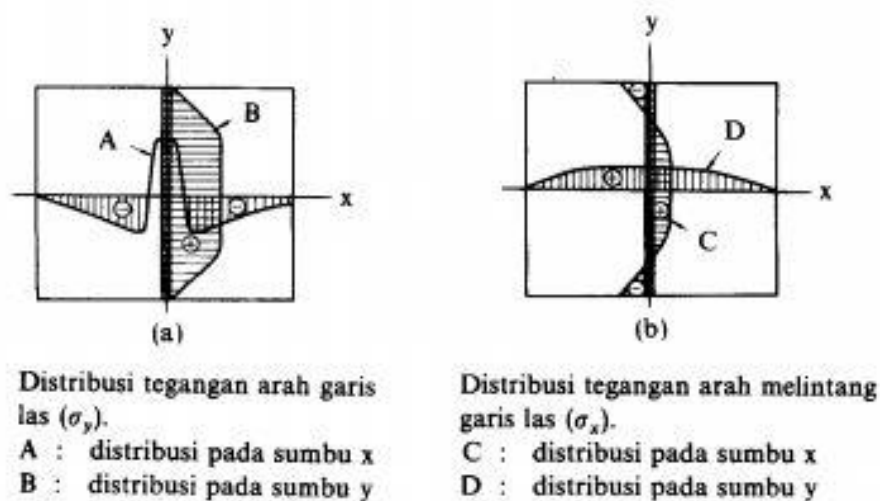
Proses terjadinya tegangan sisa menurut Wiryosumarto (1994) dalam bukunya yang berjudul Teknologi Pengelasan Logam diilustrasikan sesuai dengan Gambar 2.3, yaitu daerah C mengembang pada saat proses pengelasan. Pengembangan pada daerah C ditahan oleh daerah A, sehingga daerah C mengalami tegangan tekan dan pada daerah A mengalami tegangan tarik. Apabila luasan daerah A lebih luas dari pada daerah C, maka daerah C akan mengalami perubahan bentuk secara plastis sedangkan daerah A mengalami perubahan bentuk secara elastis. Pada waktu pengelasan selesai, terjadilah proses pendinginan yang menyebabkan daerah C akan mengalami penyusutan karena adanya tegangan tekan. Penyusutan pada daerah C akan ditahan oleh daerah A, sehingga pada daerah C akan terjadi tegangan tarik yang diimbangi oleh tegangan tekan pada daerah A.



Gambar 2.3 Ilustrasi Terbentuknya Tegangan Sisa (Wiryosumarto, 1994)

B. Distribusi Tegangan Sisa

Distribusi tegangan sisa bergantung pada jenis dan bentuk lasan. Pada alas tumpul, garis lasan arah memanjang (*longitudinal*) akan mencapai batas kekuatan luluh (*yield strength*) pada garis las dan kemudian menurun mencapai nol pada ujung plat. Sedangkan pada arah melintang (*transversal*), garis las terjadi keseimbangan antara tegangan tarik dan tegangan tekan yang ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Distribusi Tegangan Sisa pada Sambungan Las Tumpul
(Wiryosumarto,
1994)

C. Pengukuran Besarnya Tegangan Sisa

Perhitungan tegangan sisa dilakukan dengan cara menghitung besarnya regangan sisa yang terjadi dengan menggunakan hukum Hooke. Besarnya regangan sisa diperoleh dari perubahan panjang material sebelum dan sesudah dipotong. Pengukuran tersebut dilakukan untuk mendapatkan regangan sisa yang terjadi pada material. Hukum Hooke menyatakan bahwa perubahan ukuran disebabkan oleh adanya tegangan, sehingga besarnya tegangan sisa dapat dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut.

$$\sigma = E \frac{\Delta l}{l} \quad (2.1)$$

dimana,

E = modulus elastisitas

σ = tegangan Sisa yang terjadi

Δl = perubahan panjang sebelum dan sesudah dipotong

l = panjang sebelum dipotong

Pada kasus terjadinya tegangan sisa dengan dua dimensi, menurut Wiryosumarto (1994) dapat dihitung menggunakan rumus berikut.

$$\sigma_x = \frac{E}{(1-\nu^2)} (\epsilon_x + \nu \epsilon_y) \quad (2.2)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{(1-\nu^2)} (\epsilon_y + \nu \epsilon_x) \quad (2.3)$$

dimana,

σ_x = tegangan sisa tegak lurus garis las

σ_y = tegangan sisa searah garis las

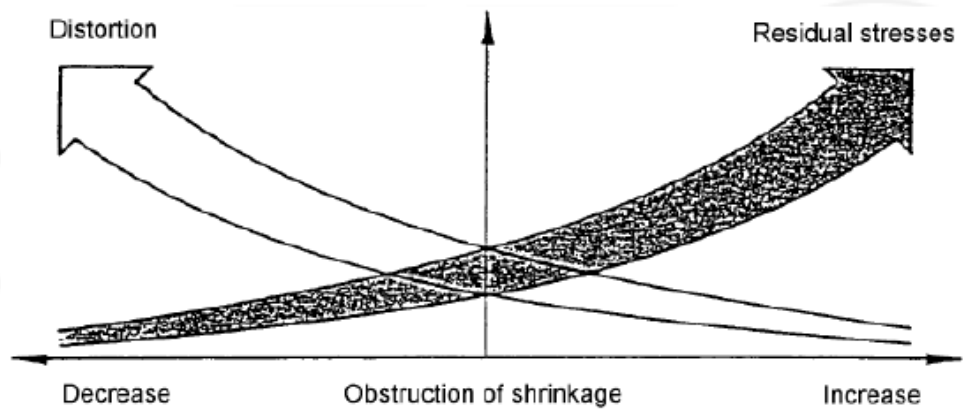
ν = *poisson ratio*

ϵ_x = regangan sisa tegak lurus garis las

ϵ_y = regangan sisa searah garis las

2.2.5 DEFORMASI PADA PENGELASAN

Tegangan sisa dan distorsi merupakan suatu hal yang berkaitan erat pada proses pengelasan. Selama pemanasan dan pendinginan yang terjadi dalam siklus pengelasan, regangan termal muncul diantara logam las dan logam induk pada daerah jalur las. Regangan yang dihasilkan selama proses pemanasan disertai pula dengan perubahan plastis. Tegangan yang dihasilkan dari regangan ini yang menghasilkan gaya dalam (*internal forces*) yang menyebabkan terjadinya *bending*, *buckling*, dan rotasi. Displasemen inilah yang disebut dengan distorsi. Hubungan antara tegangan sisa dan distorsi dapat dilihat pada Gambar 2.5.

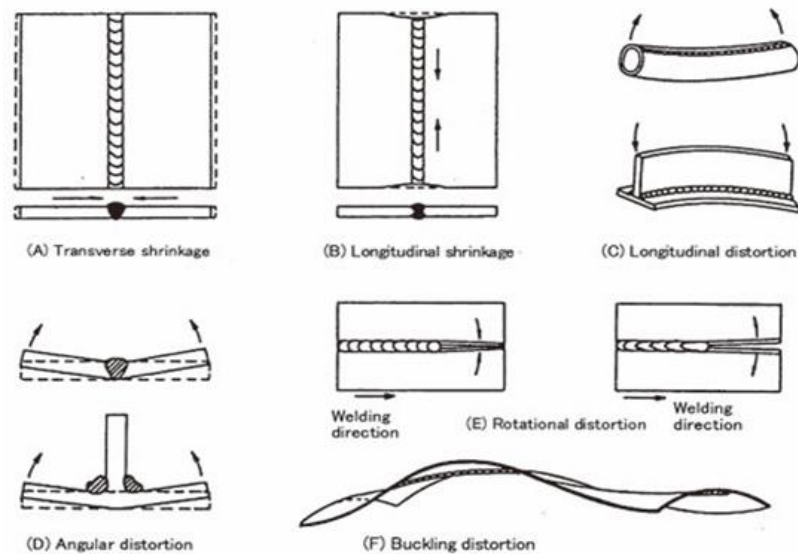


Gambar 2.5 Hubungan Antara Tegangan Sisa dan Distorsi (Syahroni dan Hidayat, 2012)

A. Macam-macam distorsi

Macam-macam distorsi atau perubahan bentuk seperti ditunjukkan pada Gambar 2.6 dapat dikelompokkan sebagai berikut.

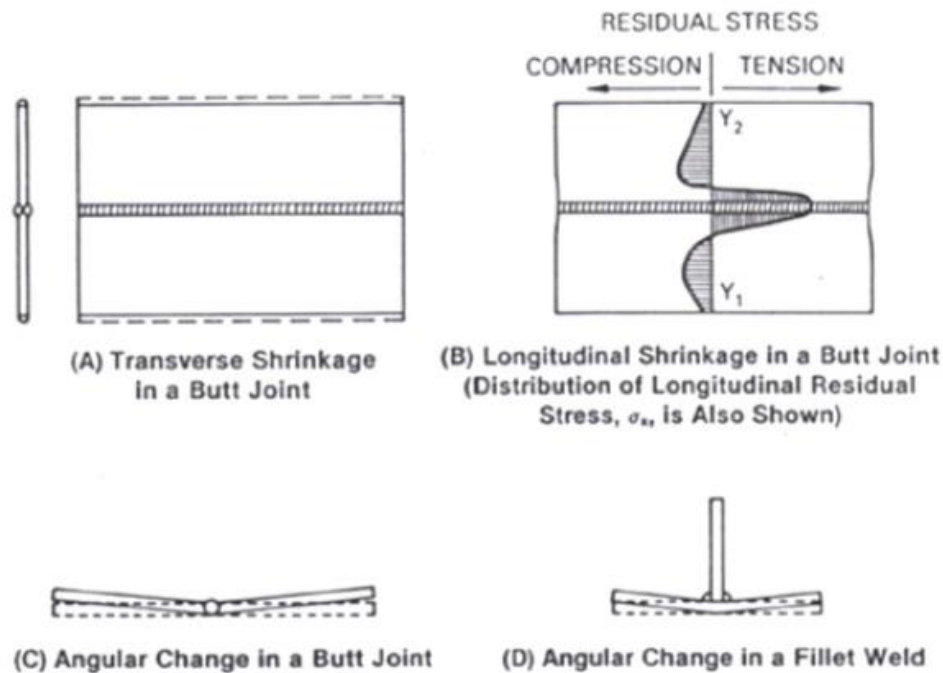
1. *Transverse shrinkage*, yaitu penyusutan tegak lurus terhadap garis las.
2. *Longitudinal shrinkage*, yaitu penyusutan searah garis las.
3. *Longitudinal distortion*, yaitu perubahan sudut dalam bidang plat yang berkaitan dengan perluasan termal.
4. *Angular distortion*, yaitu perubahan sudut dekat garis las yang disebabkan distribusi termal yang tidak merata terhadap arah ketebalan plat.
5. *Rotational distortion*, yaitu perubahan dalam bidang yang melalui garis las dan tegak lurus terhadap plat.
6. *Buckling distortion*, yaitu tegangan tekan yang berkaitan dengan panas menyebabkan ketidakstabilan ketika platnya tipis.



Gambar 2.6 Macam-macam Distorsi Dalam Pengelasan (Wiryosumarto, 1994)

Ada tiga perubahan dimensi yang mendasar akibat proses pengelasan yang dapat dengan mudah memahami mekanisme distorsi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.7 yaitu sebagai berikut.

1. Penyusutan arah melintang (*transverse shrinkage*), gambar 2.7 A adalah penyusutan tegak lurus terhadap garis las.
2. Penyusutan arah memanjang (*longitudinal shrinkage*), gambar 2.7 B, adalah penyusutan sejajar ke garis las.
3. Perubahan sudut, pada pengelasan fillet *butt joint* dan *T joint*, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.7 C dan 2.7 D deformasi terjadi dalam bentuk rotasi disekitar daerah lasan. Hal ini terjadi ketika distribusi termal yang tidak merata dalam arah ketebalan.



Gambar 2.7 Tiga Perubahan Dasar Selama Proses Pengelasan (Syahroni dan Hidayat, 2012)

2.2.5 POST WELD HEAT TREATMENT (PWHT)

Post Welding Heat Treatment merupakan proses perlakuan panas pada benda hasil pengelasan dengan tujuan untuk menghilangkan tegangan sisa yang terbentuk setelah proses pengelasan selesai. Setelah pemanasan dan pendinginan akibat proses pengelasan, sifat material akan berubah karena adanya perubahan struktur mikro. Untuk mengembalikan kembali sifat material struktur maka dilakukan pemanasan pada suhu tertentu dan pada jangka waktu tertentu. Parameter suhu dan waktu ini tergantung dari jenis material dan ketebalan material.

Berdasarkan AWS D.1.1 Structural Welding Code-Steel pada bab Prequalification section 3.14 Postweld Heat Treatment, material yang dapat diberi perlakuan PWHT harus mempunyai syarat sebagai berikut:

1. Logam dasar yang akan diberi PWHT memiliki nilai *specified minimum yield strength* yang tidak melebihi 50 ksi (345 Mpa)
2. Logam dasar yang digunakan bukan hasil *quenching & tempering, quenching & self-tempering, thermomechanical control processing* (contohnya seperti ASTM

A 500 tubing)

3. Material tidak disyaratkan untuk mengalami *impact test* pada *base metal*, *weld metal*, dan HAZ.
4. Adanya data pendukung bahwa material memiliki kekuatan dan keuletan yang cukup.
5. *Post Weld Heat Treat* dilakukan sesuai section 5.8

Post Weld Heat Treatment dilakukan sesuai berdasarkan **AWS D.1.1 Section**

5.8 tentang *Stress-Relief Heat Treatment*, harus memenuhi kriteria-kriteria berikut ini:

1. Temperatur tungku pembakaran untuk PWHT tidak boleh melebihi 600°F (315°C) pada saat benda hasil pengelasan diletakkan.
2. Diatas 600°F, *heating rate* tidak boleh melebihi 400°F per jam dibagi dengan tebal maksimum logam pada bagian tertebal, dalam inch. Diatas 315°C, *heating rate* dalam °C/jam tidak boleh melebihi 560 dibagi dengan tebal maksimum logam, tetapi tidak lebih dari 220°C/jam. Selama waktu pemanasan, variasi temperatur bagian yang dipanaskan tidak boleh melebihi 250°F(140°C) dengan interval panjang 5 m. *Heating rate* dan *cooling rate* tidak boleh kurang dari 100°F(55°C).
3. Setelah temperatur maksimum mencapai 1100°F (600°C) pada logam hasil *quenching* dan *tempering*, atau rentang temperatur rata-rata diantara 1100°F (600°C) dan 1200°F (650°C) pada logam lain, temperatur harus ditahan dengan batas waktu tertentu tergantung pada ketebalan lasan, tertera pada Tabel 2.2. Ketika *stress relief* digunakan untuk stabilitas dimensi, waktu tahan harus tidak kurang dari ketentuan di Tabel 2.2 tergantung ketebalan pada bagian tertebal. Selama *holding time*, perbedaan temperatur tertinggi dengan terendah pada bagian yang dipanaskan tidak lebih besar dari 150°F (85°C).

4. Diatas 600°F (315°C), pendinginan dilakukan pada bilik pendinginan dengan suhu tidak lebih dari 500°F (260°C) per jam dibagi dengan tebal maksimum logam pada bagian tertebal. Dari 600°F (315°C), benda las didinginkan ke temperatur ruang. *Minimum Holding Time* dapat dilihat pada Tabel 2.1

Tabel 2. 1 *Minimum Holding Time*

<i>Weld thickness</i>	<i>Holding time</i>
$\frac{1}{4}$ in atau kurang	15 menit
$\frac{1}{4}$ in – 2 in	1 jam/ in (5 menit/2 mm)
Lebih dari 2 in	2 jam plus 15 menit untuk tiap pertambahan inch (25 mm) .

Ketika PWHT tidak dapat dilakukan dengan batasan temperatur sesuai dengan kriteria di atas, maka dapat dilakukan PWHT alternatif. Dalam PWHT alternatif, pembebasan tegangan dilakukan pada temperatur yang lebih rendah tetapi dengan waktu tahan yang lebih lama. Temperatur dan waktu tahan yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2. 2 *Alternate Stress-Relief Heat Treatment*

Penurunan Temperatur di Bawah Ketentuan Temperatur Minimum		Waktu Tahan Minimum Saat Penurunan Temperatur, Jam/Inch ketebalan
$\Delta^{\circ}\text{F}$	$\Delta^{\circ}\text{C}$	
50	30	2
100	60	4
150	90	10
200	120	20

Proses PWHT ini dilakukan dengan pemanasan lokal di dekat daerah pengelasan. Parameter-parameter yang harus diperhatikan dalam PWHT adalah:

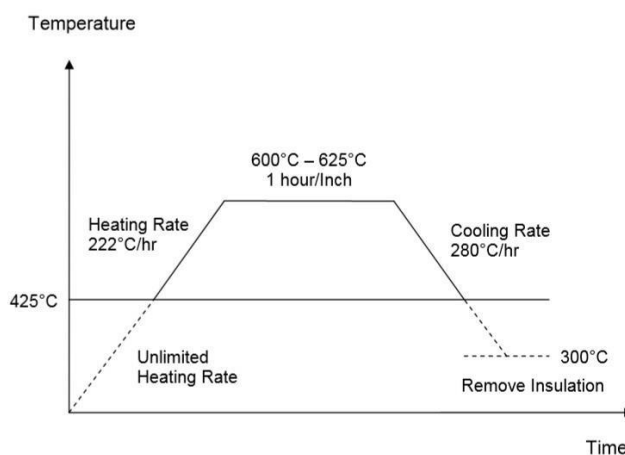
1. *Heating Rate*: proses pemanasan sampai temperature diatas atau dibawah temperature kritis suatu material.

2. *Holding Temperature*: proses penahanan material pada temperatur pemanasan untuk memberikan kesempatan adanya perubahan struktur mikro.
3. *Cooling Rate*: proses pendinginan material dengan kecepatan tertentu tergantung pada sifat akhir material yang dibutuhkan.

Dalam melakukan PWHT ada beberapa faktor penting yang harus diperhatikan agar tujuan dari PWHT ini dapat tercapai. Berikut ini adalah faktor penting tersebut:

1. *Expansion Area* : Proses pemanasan akan mengakibatkan terjadinya pemuaian dan ekspansi material. Sehingga harus diperhatikan bahwa saat *stress relieve* material tersebut tidak mengalami *restraint*
2. *Insulasi* : Area disekitar daerah yang akan di PWHT harus ditutup / dilapisi dengan *ceramic fiber* untuk menjaga kestabilan suhu
3. *Cleaning Material* : Permukaan material harus bersih
4. *Support Material* : Proses pemanasan akan mengakibatkan pelunakan material sehingga diperlukan *support* agar tidak terjadi distorsi.

Berikut adalah diagram dari Heating Treatment (Perlakuan panas) yang ditampilkan dalam Gambar 2.8



Gambar 2. 8 *Heating Treatment Diagram* (Total E&P Indonesia 2011)

2.2.6 METODE ELEMEN HINGGA

Metode elemen hingga merupakan metode numerik yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan dalam bidang rekayasa seperti geometri, pembebanan dan sifat-sifat dari material yang sangat rumit. Hal ini tidak dapat atau sulit diselesaikan dengan solusi analitis matematis (Logan, 2000). Pendekatan metode elemen hingga adalah menggunakan informasi-informasi pada titik simpul (node). Dalam proses penentuan titik simpul yang disebut pendiskritan (discretization), suatu sistem dibagi menjadi bagian-bagian yang lebih kecil, kemudian penyelesaian masalah dilakukan pada bagian-bagian tersebut dan selanjutnya digabung kembali sehingga diperoleh solusi menyeluruh.

Dalam tugas akhir ini, sambungan pada struktur pressure vessels akan dimodelkan menggunakan ANSYS Workbench 16.0. Dalam software ANSYS dapat dilakukan pemodelan 2D ataupun 3D dengan elemen titik, elemen garis, elemen area, dan elemen shell. Semua jenis elemen ini dapat digabungkan untuk membentuk struktur yang akan dianalisa.

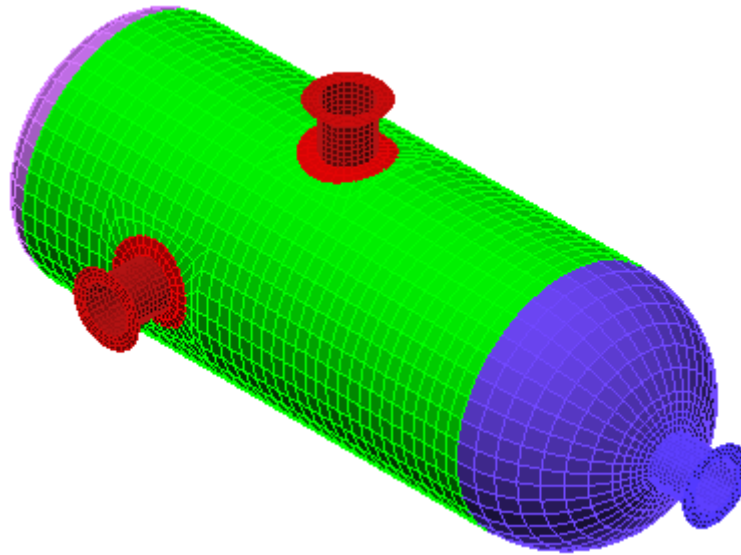
Dalam perumusan metode elemen hingga, terdapat tujuh tahap yang secara umum sering digunakan, yaitu :

1. Pendiskritan dan Pemilihan Jenis Elemen

Pemilihan jenis elemen merupakan tahap yang sangat penting karena dapat menentukan keakuratan hasil analisa. Jenis elemen harus dipilih sesuai analisa agar dapat menghasilkan hasil analisa yang mendekati keadaan sebenarnya. Hasil analisa yang mendekati keadaan sebenarnya juga tergantung dari pendiskritan yang mana dalam pemodelan disebut dengan proses *meshing*. Ukuran yang dipilih ketika proses *meshing* harus mewakili keadaan struktur sebenarnya. Semakin kecil ukuran *meshing* akan membutuhkan kapasitas hardisk dan memori yang cukup besar. Hal ini karena input data *software* semakin banyak sehingga untuk proses akan lebih berat.

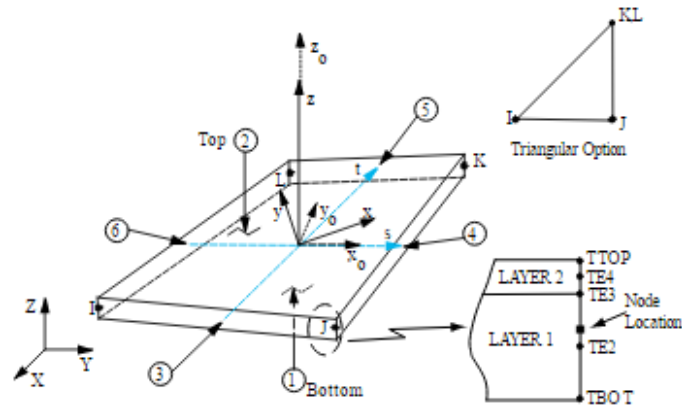
Meshing untuk ukuran elemen kecil biasanya digunakan untuk analisa dengan kondisi yang mengalami perubahan drastis. Sedangkan untuk *meshing*

ukuran elemen besar digunakan untuk analisa yang perubahannya cenderung konstan. Meshing struktur *pressure vessels* dapat dilihat pada Gambar 2.9



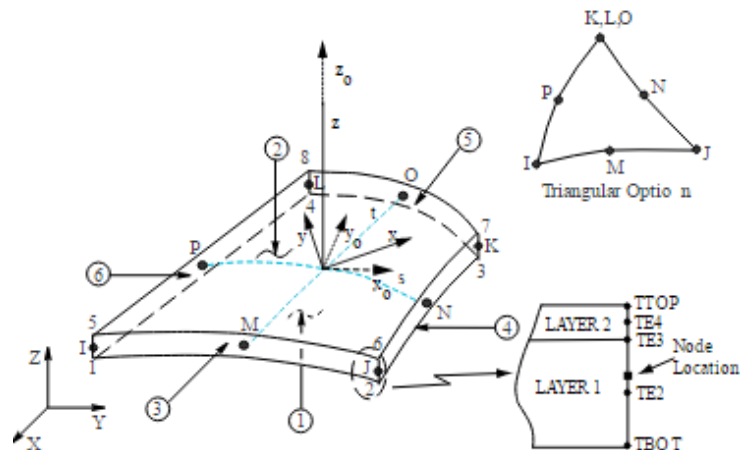
Gambar 2.9 Contoh *Meshing* Pada Struktur Bejana Tekan

Kondisi yang mengalami perubahan drastis. Sedangkan untuk *meshing* ukuran elemen besar digunakan untuk analisa yang perubahannya cenderung konstan. Jenis elemen yang digunakan pada analisa termal adalah Shell 131. Elemen Shell 131 memiliki empat node dengan masing-masing node memiliki satu derajat kebebasan dan temperatur. Bentuk geometri Shell 131 dapat dilihat pada Gambar 2.10. Elemen ini memiliki kemampuan menghantarkan panas sehingga dapat digunakan untuk analisa termal *transient* dan *steady-state*. Elemen Shell 131 dapat membentuk elemen dengan bentuk elemen prisma, tetrahedral, dan juga piramida. Elemen ini didefinisikan dengan delapan node dan ortotropik material propertis. Untuk analisa *steady-state* spesifik heat dan massa jenis dapat diabaikan. Elemen yang memiliki kemampuan menghantarkan panas ini otomatis dapat juga digunakan untuk analisa struktural. Ketika proses analisa termal menggunakan Shell 131 sudah selesai dilakukan, otomatis pada proses analisa struktural jenis elemen akan berubah menjadi Shell 132.



Gambar 2.10 Geometri Elemen Shell 131

Jenis elemen yang digunakan pada analisa struktural adalah SHELL132. Elemen SHELL132 memiliki delapan node dengan masing-masing node memiliki tiga derajat kebebasan. Elemen ini dapat bertranslasi ke arah sumbu x dan y. Jenis elemen Shell132 dapat dilihat pada Gambar 2.11



Gambar 2.11 Geometri Elemen Shell 132

2. Pemilihan fungsi displasemen

Menentukan fungsi displasemen yang didefinisikan pada tiap elemen dengan menggunakan nilai parameter di tiap node elemen. Fungsi yang digunakan adalah fungsi polinomial, linear kuadratik, kubik, atau deret trigonometri.

$$\{w\} = [N]\{u\} \quad (2.3)$$

3. Definisi hubungan regangan-displasmen dan tegangan-regangan

Dapat ditentukan hubungan regangan akibat displasmen yang sudah ditentukan pada tahap sebelumnya. Hubungan tegangan-regangan nanti akan digunakan dalam proses penurunan persamaan untuk masing-masing elemen.

$$\sigma = D \varepsilon^{el} \quad (2.4)$$

dan

$$\varepsilon = \varepsilon^{el} + \varepsilon^{th} \quad (2.5)$$

dimana:

ε : regangan total

ε^{el} : regangan elastis

ε^{th} : regangan termal

D : kekakuan material

Vector thermal strain untuk isotropik medium dengan suhu yang tergantung pada koefisien ekspansi termal, dengan rumus:

$$\varepsilon^{th} = \Delta T \alpha(T) \quad (2.6)$$

ΔT adalah perbedaan antara *reference temperature* dengan *actual temperature*.

4. Penentuan matriks kekakuan elemen dan persamaan elemen

Untuk menentukan matriks kekakuan dan persamaan elemen dapat digunakan metode keseimbangan langsung dan metode energi dengan menggunakan prinsip energi potensial minimum.

$$\delta U = \delta P \quad (2.7)$$

Dimana:

U : *internal strain energy (internal work)*

P : *external work*, seperti efek inersia

δ : *virtual operator*

Virtual strain energy dapat ditulis:

$$\delta = \int [\delta \varepsilon]^T \{\sigma\} d\{V\} \quad (2.8)$$

Dimana:

ε : vektor regangan

σ : vektor tegangan

V : volumen elemen

Substitusi persamaan (3.8) dan (3.9) untuk memperoleh δU

$$\delta U = \int (\{\delta \varepsilon\}^T [D] \{\varepsilon\} - \{\delta \varepsilon\}^T [D] \{\varepsilon^{th}\}) dV \quad (2.9)$$

Strain yang dikaitkan dengan nodal displasmen:

$$\{\varepsilon\} = [B] \{u\} \quad (2.10)$$

Untuk displasmen konstan, energi regangan *virtual* adalah:

$$\delta U = \{\delta \varepsilon\}^T \int [B]^T [D] [B] dV \{u\} - \{\delta u\}^T \int [B]^T [D] \{\varepsilon^{th}\} dV \quad (2.11)$$

External work karena gaya inersia diformulasikan sebagai:

$$\delta P = - \int \{\delta w\}^T \{F^a\} dV \quad (2.12)$$

dimana,

w : vektor displasmen dari general point

$\{F^a\}$: vektor *acceleration force*

Berdasarkan hukum gerak Newton II:

$$\{F^a\} = \rho \frac{\partial^2}{\partial \tau^2} \{w\} \quad (2.13)$$

Jika displasmen dengan elemen dihubungkan pada nodal displasmen:

$$\{w\} = [N] \{u\} \quad (2.14)$$

Persamaan (2.12) dapat ditulis kembali menjadi:

$$\delta P = -\{\delta u\}\rho \int \{N\}^T [N] dV \frac{\partial^2}{\partial \tau^2} \{u\} \quad (2.15)$$

Lalu substitusi persamaan (2.11) dengan persamaan (2.15) , menjadi:

$$\begin{aligned} \{\delta \varepsilon\}^T \int [B]^T [D] [B] dV \{u\} - \{\delta u\}^T \int [B]^T [D] \{\varepsilon^{th}\} dV = \\ -\{\delta u\}\rho \int \{N\}^T [N] dV \frac{\partial^2}{\partial \tau^2} \{u\} \end{aligned} \quad (2.16)$$

$\{\delta u\}^T$ vektor adalah sebuah displasmen umum yang sebenarnya, sebuah kondisi diperlukan untuk memenuhi persamaan displasmen konstan dikurangi sampai:

$$[K_c] - \{F_c^{th}\} = [M_c]\{\ddot{u}\} \quad (2.17)$$

Dimana,

$$[K_c] = \int [B]^T [D] [B] dV \rightarrow \text{Matriks kekakuan elemen} \quad (2.18)$$

$$\{F_c^{th}\} = \int [B]^T [D] [\varepsilon^{th}] dV \rightarrow \text{Vektor beban termal elemen} \quad (2.18)$$

$$\{M_c\} = \rho \int [N]^T [N] dV \quad (2.19)$$

5. Penggabungan persamaan elemen dengan penentuan kondisi batas

Pada tahap ini akan didapatkan matriks kekakuan global yang bersifat singular. Kondisi batas digunakan untuk menghilangkan singularitasnya. Matriks kekakuan global didapatkan dari menggabungkan persamaan elemen pada tahap empat menggunakan metode kekakuan langsung.

6. Penyelesaian derajat kebebasan yang belum diketahui

Mendapatkan hasil besaran yang diperlukan tetapi tidak didapat secara langsung dari tahap sebelumnya. Dapat dicari dengan metode eliminasi (misalkan metode *gauss*) dan iterasi (misalkan metode *gauss-siedel*).

7. Penentuan regangan dan tegangan elemen

Perhitungan regangan dan tegangan yang terjadi pada elemen berdasarkan hasil dari tahap enam.

8. Penampilan hasil

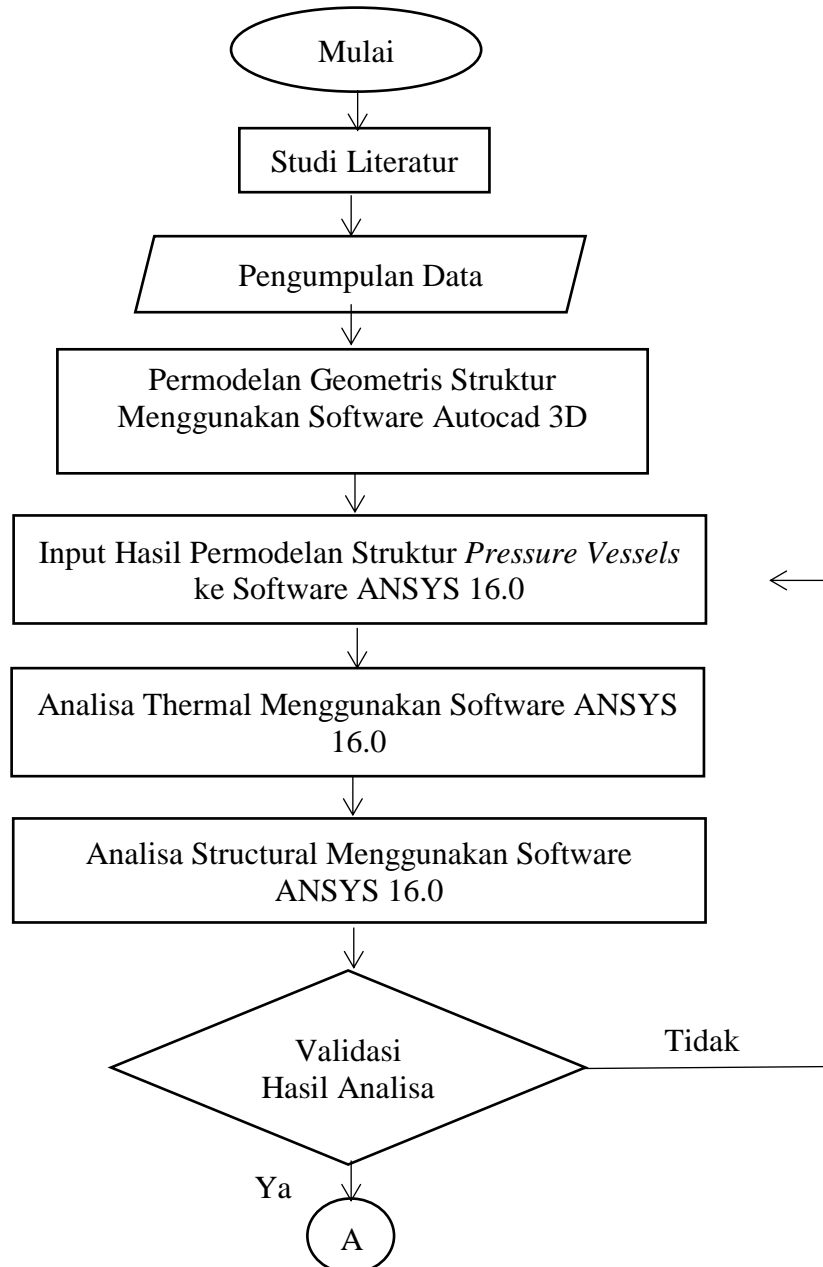
Hasil yang diperoleh ditampilkan dalam bentuk grafis sehingga akan mempermudah pembacaan hasil.

BAB III

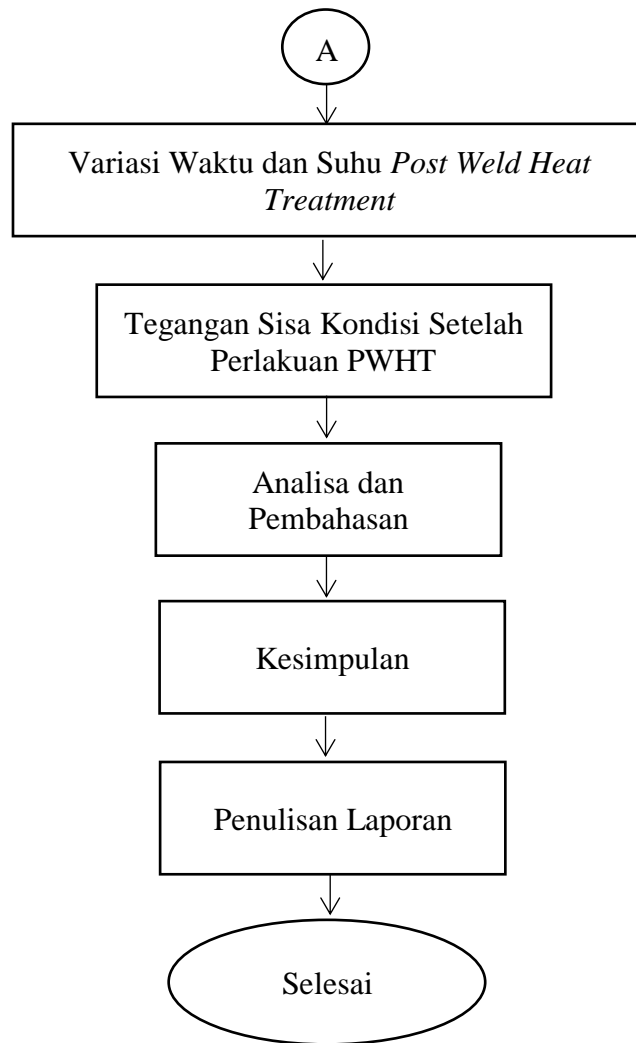
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 SKEMA DIAGRAM ALIR

Untuk mempermudah proses pelaksanaan penelitian dalam Tugas Akhir ini, maka disusunlah alur penelitian pada Gambar 3.1 sebagai berikut:



Gambar 3.1 Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir.



Gambar 3.1 Lanjutan Gambar Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir

3.2 PENJELASAN DIAGRAM ALIR

1. Studi Literatur

Pada tahap ini berisi tentang kegiatan mencari, mengkaji, dan mengumpulkan materi serta informasi yang relevan yang dapat menjadi acuan dalam pengerjaan tugas akhir ini.

2. Pengumpulan Data

Data yang dibutuhkan merupakan suatu hal yang sangat penting guna untuk melakukan input saat proses analisa. Dalam hal ini *Welding Procedur Spesification* atau WPS menggunakan data yang berasal dari PT. Gearindo

Prakarsa dan juga data dimensi struktur yang didapatkan di PT. Petrokimia Gresik

3. Permodelan Geometri

Membuat model geometri struktur bejana tekan (*pressure vessels*) sesuai dengan data dimensional yang di dapatkan di PT. Petrokimia Gresik dengan menggunakan software Autocad.

4. Input Hasil Permodelan dari Autocad ke Software ANSYS

Memasukkan output permodelan geometri dilakukan menggunakan software Autocad ke dalam software ANSYS. Kemudian mengamati secara jeli sehingga model yang diinginkan sesuai dengan input yang ada di software ANSYS.

5. Analisa Thermal Struktur Menggunakan Software ANSYS

Setelah geometri dimasukkan, sebelum dilakukan analisa termal perlu dilakukan *meshing*. *Meshing* merupakan pembagian sambungan tubular menjadi elemen-elemen kecil dengan bentuk elemen tertentu. Elemen yang digunakan adalah SHELL131. Setelah itu dimasukkan data properti material bejana tekan yang digunakan termasuk data termal material. Beban termal dilakukan secara transient sesuai dengan alur pengelasan yang dilakukan. Lalu dilakukan *running/solve* sehingga didapatkan hasil pemodelan *thermal*. Hasil yang didapat dari analisa ini berupa distribusi panas.

6. Analisa Struktural Menggunakan Software ANSYS

Pada tahap ini hasil dari analisa *thermal* berupa regangan *thermal* diubah menjadi regangan struktural. Tipe analisis yang dilakukan diubah dari *thermal* menjadi analisa struktural. Lalu diberi beban yang mengenai struktur sesuai dengan data. Setelah itu dilakukan *running/solve* sehingga didapatkan hasil dari analisa struktural. Analisa struktural menghasilkan regangan struktural yang mengakibatkan timbulnya tegangan struktural. Selain itu juga

didapatkan hasil distorsi yang terjadi. Hasil dari analisa ini berupa tegangan sisa pada kondisi as- welded.

7. Validasi Hasil Analisa Struktural dan Thermal

Selanjutnya adalah validasi hasil tegangan sisa kondisi as-welded, hasil yang didapatkan pada tahap sebelumnya berupa tegangan sisa akan dicek dan dibandingkan dengan tegangan sisa yang didapatkan dari hasil eksperimen. Begitu juga dengan hasil deformasi yang terjadi pada struktur *pressure vessels*. Dalam hal bukan ditentukan dari nilai tegangan sisa antara numeris dengan eksperimen tetapi dari tren grafik hasil tegangan sisa pada perhitungan numeris dan juga dari hasil eksperimen.

8. Variasi Waktu Tahan dan Suhu *Post Weld Heat Treatment*

Tahap selanjutnya adalah memberi perlakuan PWHT. PWHT ini dilakukan dengan memberikan beban panas kembali selama waktu tahan tertentu. PWHT dilakukan dengan variasi suhu dan waktu tahan. Variasi menggunakan suhu dan waktu tahan standar.

9. Analisa dan Pembahasan

Setelah didapatkan tegangan sisa hasil running permodelan dari software ANSYS maka akan didapatkan tegangan sisa pada saat kondisi as-welded dan setelah diberi perlakuan PWHT, maka akan dibandingkan seberapa besar pengaruh dari PWHT terhadap tegangan sisa.

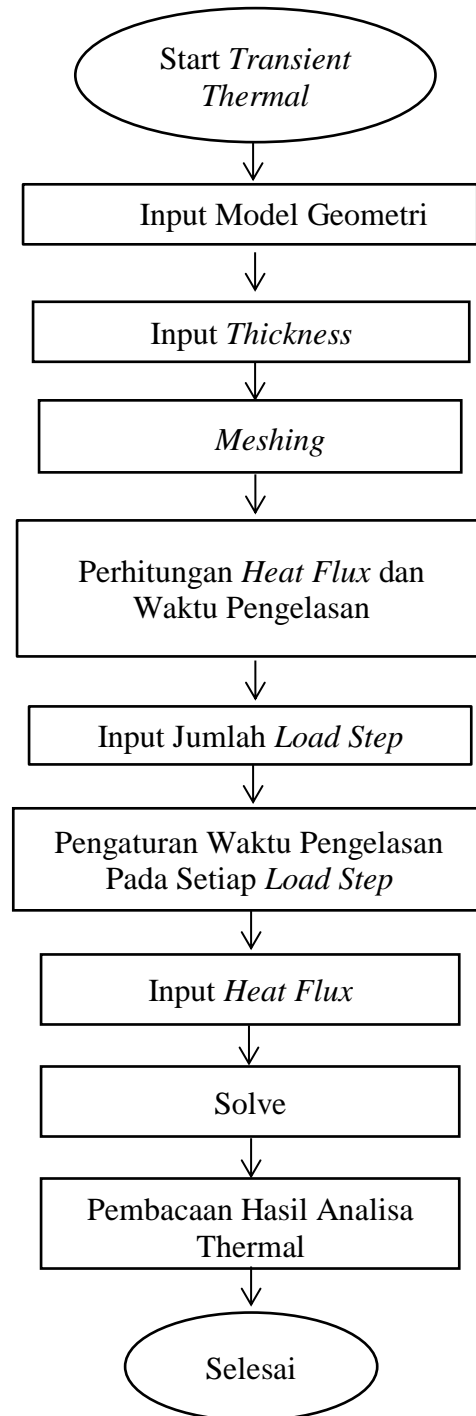
10. Kesimpulan

Hasil analisa pada tugas akhir ini merupakan tegangan sisa yang terjadi pada pengelasan struktur *pressure vessels*. Sehingga dapat dihasilkan kesimpulan berdasarkan tujuan Analisa.

3.3 DIAGRAM ALIR ANALISA THERMAL DAN STRUKTURAL

A. DIAGRAM ALIR ANALISA THERMAL

Diagram alir analisa thermal pada Gambar 3.2 sebagai berikut :



Gambar 3.2 Diagram Alir Analisa Thermal

Penjelasan Diagram Alir Analisa Thermal pada Gambar 3.2 adalah sebagai berikut:

1. *Start Transient Thermal*

Langkah pertama untuk memulai pemodelan dengan menggunakan ANSYS adalah pada tampilan utama software ANSYS kita pilih *transient thermal* untuk melakukan analisa thermal ini.

2. *Pembuatan Geometri*

Pembuatan *design* geometri model dibuat dalam bentuk 3 Dimensi dengan menggunakan *software* Autocad dengan dimensi yang telah ditentukan. Setelah geometri selesai dibuat, karena *software* yang digunakan berbeda dengan *software* untuk melakukan proses analisa *thermal* dan *structural* model tersebut disimpan dalam format IGES sehingga ANSYS sebagai *software* analisa mampu membaca. Apabila ANSYS tidak mampu membaca berate ada kesalahan pada saat pembuatan geometri sehingga dilakukan kembali design geometri menggunakan Autocad.

3. *Input Data Thickness*

Gemoteri model yang telah digambarkan di menggunakan *software* Autocad tersebut kemudian diinputkan kedalam *software* ANSYS dalam format IGS untuk dilakukan analisa *thermal*. Pengaturan ketebalan material dan sifat material (*Material Properties*) dapat dilakukan sebelum ketahap berikutnya..

4. *Meshing*

Pada tahap ini model yang telah diberikan ketebalan dan sifat material dibagi menjadi beberapa elemen. *Meshing* bertujuan untuk membagi keseluruhan model menjadi beberapa elemen sehingga Perhitungan dapat dilakukan terhadap titik-titik secara lebih teliti. *Meshing* dapat diatur sesuai dengan tingkat ketelitian yang diinginkan. Semakin banyak elemen meshing yang dibuat semakin teliti perhitungannya.

5. *Perhitungan Heat Flux dan Waktu Pengelasan*

Pada tahap ini memerlukan perhitungan *heat flux* dan waktu pengelasan untuk input analisa thermal.

6. Input Jumlah Load Step

Input jumlah seluruh load step yang digunakan untuk analisa thermal.

7. Pengaturan Waktu Pengelasan Pada Tiap Load Step

Pengaturan waktu ini adalah untuk memberikan waktu yang digunakan untuk setiap area Load Step untuk melakukan analisa thermal.

8. Input Heat Flux

Setelah melakukan perhitungan heat flux lalu di input ke analisa thermal untuk dilakukan *running*.

9. Solve

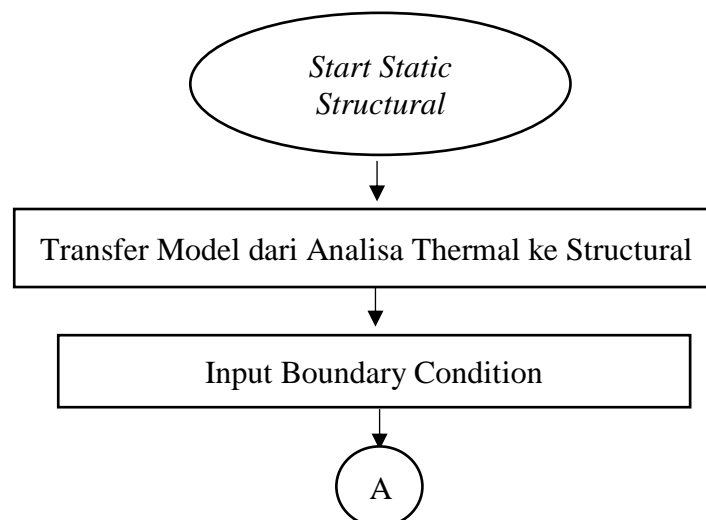
Running analisa thermal.

10. Pembacaan Hasil Analisa Thermal

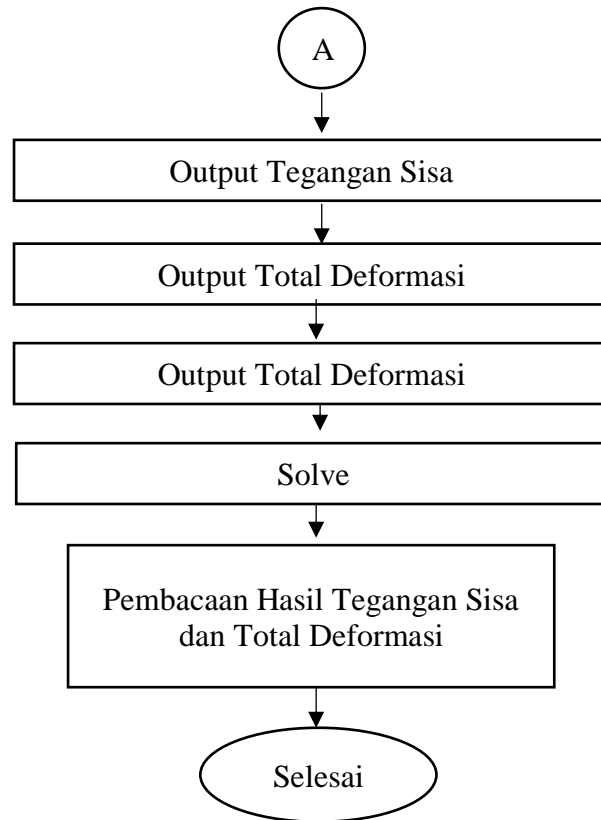
Pada langkah ini adalah kita melihat hasil analisa thermal yang berupa simulasi pengelasan dan distribusi panas yang terjadi pada struktur *pressure vessels*.

B. DIAGRAM ALIR ANALISA STRUKTURAL

Diagram alir analisa thermal pada Gambar 3.3 sebagai berikut :



Gambar 3.3 Diagram Alis Analisa Struktural



Gambar 3.3. Lanjutan Diagram Alir Analisa Struktural

1. *Start Static Structural*

Pada tahap ini, pada tampilan utama software ANSYS pilih untuk analisa *static structural*.

2. *Transfer Model dari Analisa Thermal ke Analisa Struktural*

Pada tahap ini adalah mentransfer model dari beban panas untuk dilanjutkan ke analisa struktural.

3. *Input Boundary Condition*

Pada tahap ini diperlukan input *boundary condition* untuk analisa struktural pada struktur *pressure vessels*.

4. *Output Tegangan Sisa*

Pada tahap ini pilih tegangan sisa untuk output analisa struktural pada struktur *pressure vessels*.

5. Output Total Deformasi

Pada tahap ini pilih total deformasi untuk output analisa struktural pada struktur *pressure vessels*.

6. Solve

Pada tahap ini dilakukan *running* setelah memasukkan input dan output.

7. Pembacaan Hasil Tegangan Sisa dan Total Deformasi

Pada tahap ini diketahui hasil analisa struktural berupa tegangan sisa dan total deformasi.

BAB IV

ANALISA DAN PEMBAHASAN

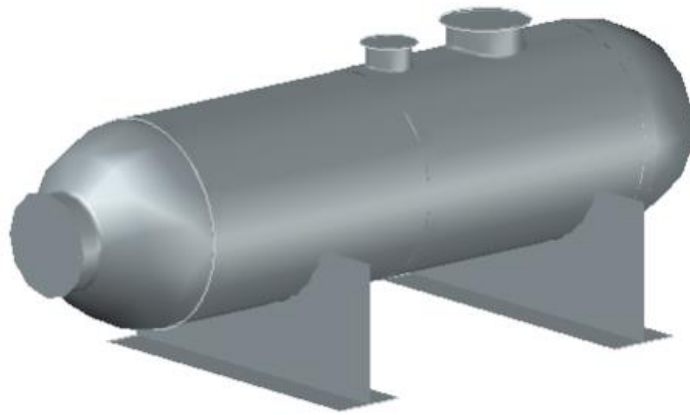
4.1. PERMODELAN STRUKTUR

Dalam tugas akhir ini dimodelkan struktur bejana tekan (*pressure vessels*) milik PT. Petrokimia Gresik. Permodelan pengelasan struktur bejana tekan dalam tugas akhir ini menggunakan software Autocad 2017 sesuai dengan dimensi dan bentuk geometri yang ada dalam data. Setelah geometri selesai dibuat maka model sambungan tubular dikonversikan ke dalam ANSYS 16.0 untuk mengetahui apakah bentuk geometri sesuai dengan struktur bejana tekan yang sebenarnya. Berikut data geometri struktur bejana tekan dari PT. Petrokimia Gresik yang disajikan pada Tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Ukuran Geometri Struktur *Pressure Vessels* PT. Petrokimia Gresik

Material	Al-6061-T6
Outer Diameter	2380 mm
Inner Diameter	2086 mm
Total Length	8100 mm
Cap Thickness	304,8 mm

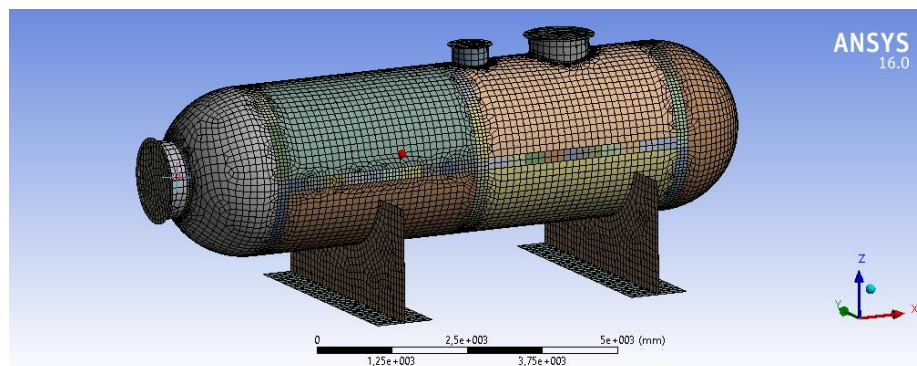
Hasil permodelan struktur bejana tekan (*pressure vessels*) menggunakan software Autocad 2017 akan ditampilkan pada Gambar 4.1 berikut



Gambar 4. 1 Model Geometri Struktur Pressure Vessels

4.2. MESHING

Sebelum dilakukan pembebanan *heat flux* pada model perlu dilakukan *meshing*. *Meshing* adalah membagi model menjadi elemen-elemen kecil. Variasi panjang meshing akan menghasilkan jumlah node yang berbeda. Pemilihan bentuk dan ukuran *meshing* akan mempengaruhi hasil, waktu *solving*, jumlah elemen, dll. Dalam simulasi ini digunakan *meshing* bentuk hexahedral dan tetrahedral, seperti yang tampak pada Gambar 4.2



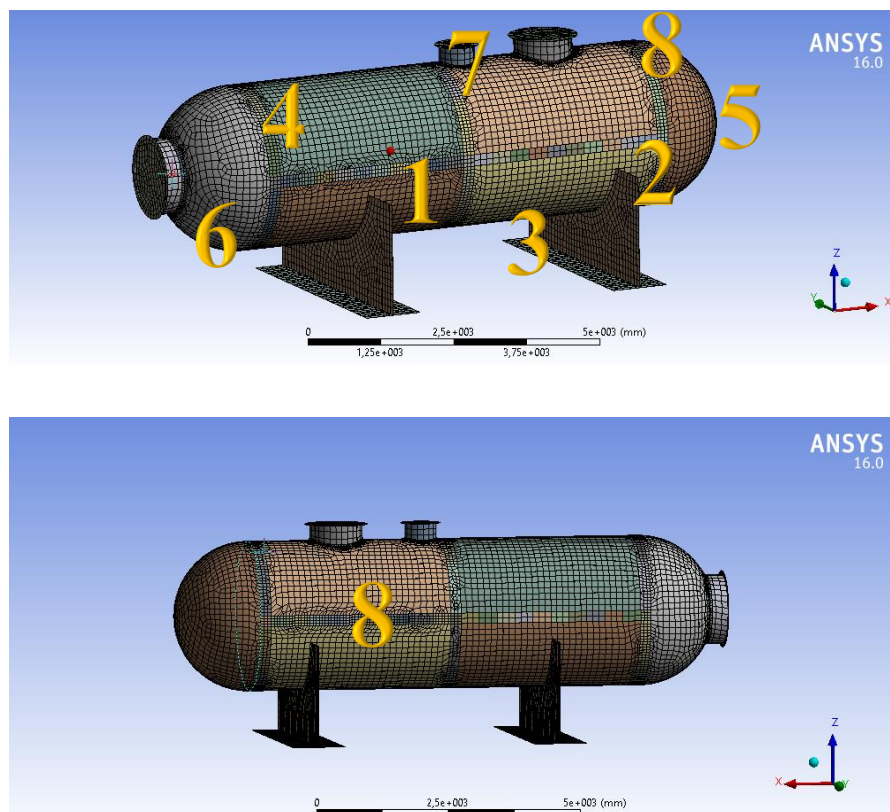
Gambar 4.2 Bentuk Meshing dari Struktur Pressure Vessels

Bentuk dan ukuran meshing antara daerah yang dekat dengan lasan dan yang jauh dari lasan berbeda, misalnya pada daerah dekat dengan sambungan digunakan bentuk meshing tetrahedral karena dapat secara

detail menganalisa daerah las sedangkan daerah yang jauh dengan sambungan las digunakan bentuk meshing hexahedral karena untuk memperingan kerja dari komputer. Ukuran meshing tetrahedra yaitu 3 mm sedangkan hexahedral 5 mm

4.3 URUTAN PENGELASAN

Untuk mengetahui besarnya tegangan sisa yang terbentuk, maka digunakan beberapa variasi dalam simulasi pengelasan. Dalam hal ini yaitu penentuan urutan pengelasan. Penomoran area las yaitu untuk menentukan urutan pengelasan akan dijelaskan pada Gambar 4.3



Gambar 4.3 Urutan Simulasi Pengelasan Pada Struktur *Pressure Vessels*

4.4 PERHITUNGAN BEBAN HEAT FLUX

Simulasi pengelasan pada sambungan tubular akan diberikan pada tiap permukaan elemen yang akan ditransfer menjadi beban. Beban yang

diberikan merupakan heat flux dimana besaran diperoleh dari heat input bersih yang mengenai tiap elemen. Para meter pengelasan yang digunakan untuk mensimulasikan sambungan lasan.

Proses	: <i>Single Pass</i> GMAW
Jenis lasan	: <i>GAS Metal Arc Welding</i>
Arus	: 100 A
Voltase	: 38 V
Kecepatan las	: 225 mm/min
Diameter Elektroda	: 4 mm

1. Beban Heat Flux Untuk Area 1 dan 2

- Heat input

$$Q = \eta U I$$

Dimana:

Q : Net heat input (Watt)

η : Koefisien efisiensi

U : Tegangan busur (Volt)

I : Arus Listrik (Ampere)

Dengan:

η : 0.75

U : volt

I : 100 Ampere

$$Q = \eta U I$$

$$= 0.75 \times 38 \times 100$$

$$= 2850 \text{ watt}$$

- Heat flux tiap elemen

$$q_1 = q_e \frac{A_1}{A_f}$$

Dimana:

- q_1 : *heat flux* pada elemen (J/mm²)
 q_e : *heat flux* yang dihasilkan elektroda (J/mm²)
 A_1 : luas permukaan elemen (mm²)
 A_f : luasan fluks yang dihasilkan elektroda (mm²)

➤ Menghitung *Heat Flux* Elektroda

$$q_e = \frac{Q}{A_f} ; \quad A_f : \text{luasan fluks yang dihasilkan elektroda}$$

$$q_e = \frac{Q}{\pi r^2} ; \quad r : \text{jari-jari elektroda}$$

$$q_e = \frac{2850}{\pi \cdot 2^2}$$

$$q_e = 223.925 \text{ watt/mm}^2$$

➤ Menghitung Luas Elemen

Luas area yang dilas dan jumlah elemen meshing dalam area las didapatkan dari software Ansys untuk menghitung luas elemen.

$$A_1 = \frac{A}{n \text{ elemen}}$$

Dimana,

A : Luas Area yang dilas

$n \text{ elemen}$: jumlah elemen meshing dalam area las

dengan,

$$A = 2300 \text{ mm}^2$$

$$n \text{ elemen} = 10$$

maka,

$$A_1 = \frac{2300}{10}$$

$$A_1 = 230 \text{ mm}^2$$

➤ Menghitung waktu pengelasan pada satu area

Untuk menghitung waktu pengelasan pada suatu area dibutuhkan panjang area pengelasan, panjang area pengelasan didapat dari software ansys.

$$t = \frac{p}{v}$$

Dimana,

t = waktu pengelasan pada satu area

p = Panjang area pengelasan

v = kecepatan pengelasan

Dengan,

p = 3050 mm

v = 100 mm/min

v = 1.66 mm/s

maka,

$$t = \frac{3050}{1.66}$$

$$t = 1837,34 \text{ detik}$$

➤ Menghitung Luasan *Flux* yang Dihasilkan Elektroda

$$A_f = b \cdot v \cdot t$$

Dimana,

b : Lebar area las

v : Kecepatan pengelasan

t = waktu pengelasan satu area

dengan,

b = 47.13 mm

v = 1.66 mm/s

t = 1837,34 s

maka,

$$A_f = b \cdot v \cdot t$$

$$A_f = 47.13 \times 1.66 \times 1837.34$$

$$A_f = 143.745,7 \text{ mm}^2$$

Setelah melakukan perhitungan-perhitungan di atas, selanjutnya adalah melakukan perhitungan *heat flux*.

$$q_1 = q_e \frac{A_1}{A_f}$$

$$q_1 = 223.92 \frac{230}{143.745,7}$$

$$q_1 = 0.35 \text{ watt/mm}^2$$

Dari perhitungan di atas diketahui beban heat flux yang mengenai elemen adalah sebesar 0.35 watt/mm². Beban *heat flux* ini akan diaplikasikan pada tiap elemen secara *transient*.

2. Beban Heat Flux Untuk Area 3,4 dan 5

Setelah melakukan perhitungan-perhitungan di atas, selanjutnya adalah melakukan perhitungan *heat flux*.

$$q_1 = q_e \frac{A_1}{A_f}$$

$$q_1 = 223.92 \frac{230}{165.721,8}$$

$$q_1 = 0.31 \text{ watt/mm}^2$$

Dari perhitungan di atas diketahui beban heat flux yang mengenai elemen adalah sebesar 0,31 watt/mm². Beban *heat flux* ini akan diaplikasikan pada tiap elemen secara *transient*.

3. Beban Heat Flux Untuk Brace 6,7 dan 8

Setelah melakukan perhitungan-perhitungan di atas, selanjutnya adalah melakukan perhitungan *heat flux*.

$$q_1 = q_e \frac{A_1}{A_f}$$

$$q_1 = 223.92 \frac{230}{185.642,7}$$

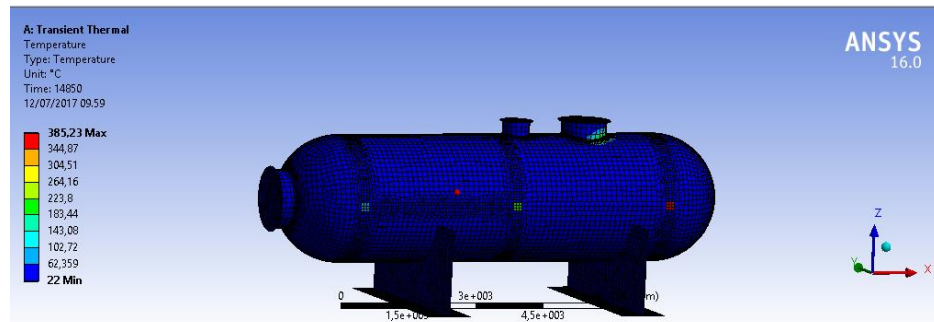
$$q_1 = 0.26 \text{ watt/mm}^2$$

Dari perhitungan di atas diketahui beban heat flux yang mengenai elemen adalah sebesar 0.26 watt/mm². Beban *heat flux* ini akan diaplikasikan pada tiap elemen secara *transient*.

4.5 HASIL ANALISA THERMAL

Pada saat pengelasan terjadi beban panas yang dapat menyebabkan terjadinya regangan dan tegangan pada daerah yang terkena dampak lasan.

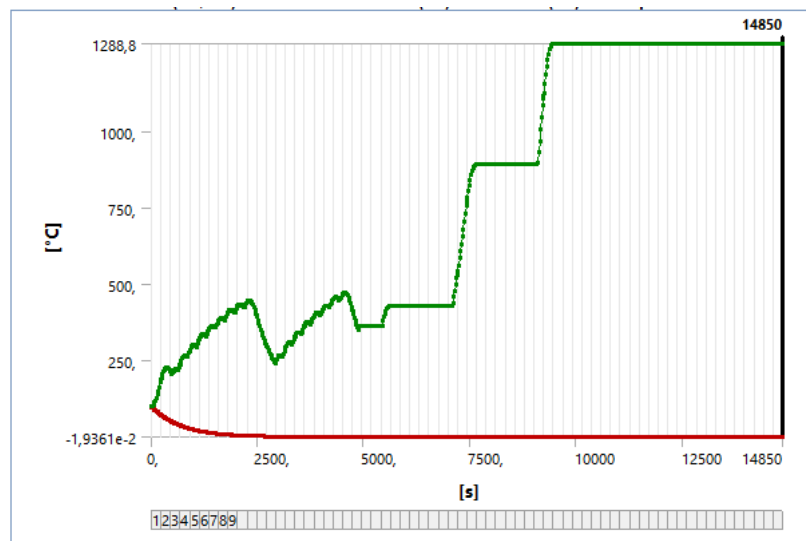
Selain itu simulasi pengelasan dalam tugas akhir ini juga menghasilkan distribusi panas daerah sekitar lasan. Suhu pengelasan yang ditinjau pada saat awal pengelasan. Pada Gambar 4.4 dapat dilihat hasil distribusi panas.



Gambar 4.4. Hasil Analisa Thermal Pada Struktur *Pressure Vessels* dengan ANSYS *workbench* 16.0

4.5.1 DISTRIBUSI PANAS

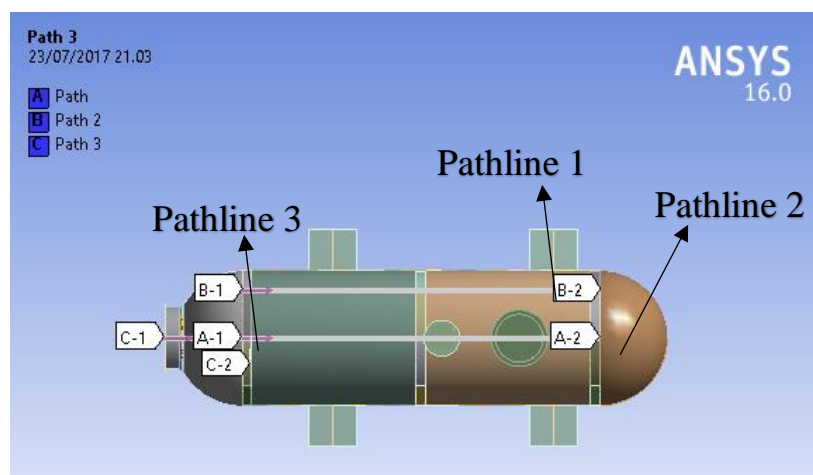
Untuk mengetahui suhu maksimal pengelasan pada setiap Daerah pengelasan yang sudah ditentukan dapat didapat dari beban *Heat Flux*. Siklus pengelasan yang disimulasikan dimulai dari 1-2-3-4-5-6-7-8 sehingga setiap puncak dari grafik berikut adalah suhu maksimum dari setiap Daerah pengelasan. Dan dapat ditinjau dari Gambar 4.5.



Gambar 4.5. Distribusi Temperatur pada Setiap Titik Pengelasan

4.5.2 HASIL ANALISA TEGANGAN SISA

Tegangan sisa memiliki arah secara aksial dan tengsial, dalam analisa kali ini hanya digunakan tegangan sisa aksial saja. Penentuan tegangan sisa aksial juga berdasarkan pathline atau garis sumbu untuk mengetahui besarnya tegangan sisa tersebut. Pembacaan tegangan sisa dilakukan pada daerah badan struktur berdasarkan pathline yang telah dibuat. Gambar 4.6. menjelaskan pathline untuk menentukan nilai tegangan sisa.

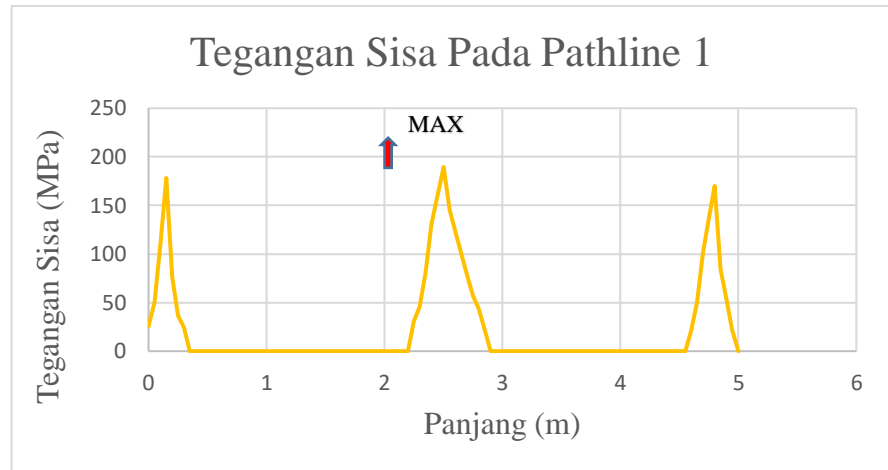


Gambar 4.6. *Pathline* Untuk Pembacaan Tegangan Sisa

4.5.2.1 DISTRIBUSI TEGANGAN SISA PADA PATHLINE

1

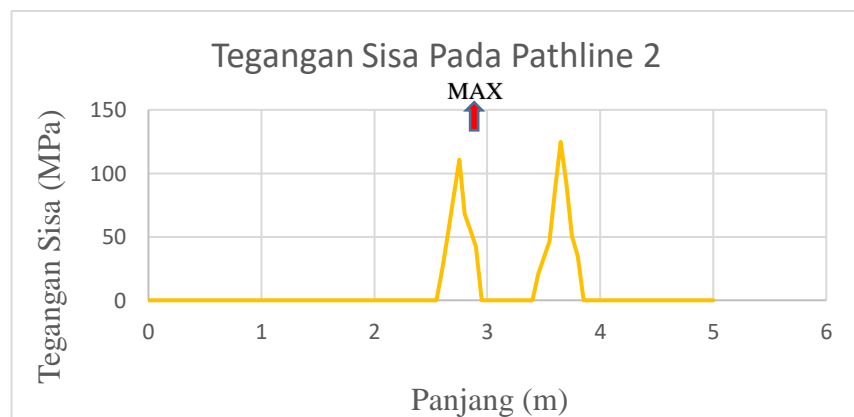
Tegangan sisa yang terjadi di daerah dekat area pengelasan merupakan tegangan tarik dan memiliki nilai tegangan terbesar. Sedangkan di titik yang berjarak semakin jauh dengan weldtoe maka nilainya akan semakin mendekati 0 (nol). Pada Gambar 4.7. yang menunjukkan *Pathline* 1 dengan nilai tegangan sisa maksimal adalah sebesar 189,5 MPa.



Gambar 4.7. Tegangan yang Terjadi Pada Struktur *Pressure Vessels* pada *pathline 1*

4.5.2.2 DISTRIBUSI TEGANGAN SISA PADA PATHLINE 2

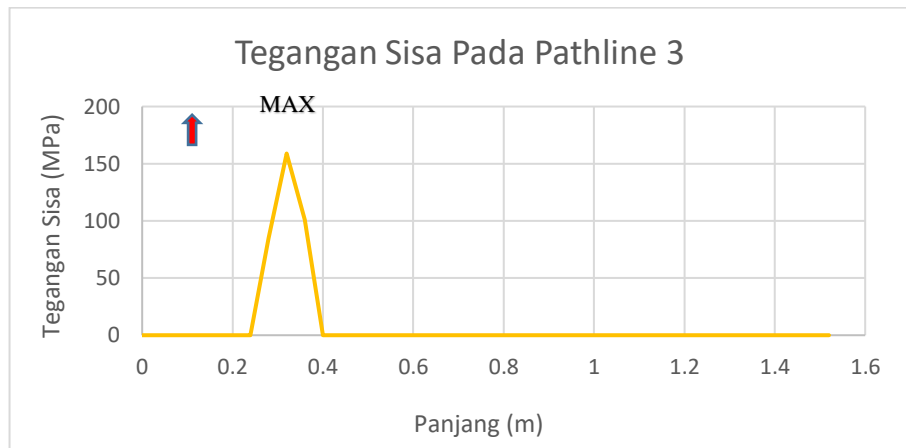
Tegangan sisa yang terjadi di daerah dekat area pengelasan merupakan tegangan tarik dan memiliki nilai tegangan terbesar. Sedangkan di titik yang berjarak semakin jauh dengan weldtoe maka nilainya akan semakin mendekati 0 (nol). Pada Gambar 4.8. *Pathline 2* dengan nilai tegangan sisa maksimal adalah sebesar 124,8 MPa.



Gambar 4.8. Tegangan yang terjadi pada struktur *pressure vessels* pada *pathline 2*

4.5.2.3 DISTRIBUSI TEGANGAN SISA PADA PATHLINE 3

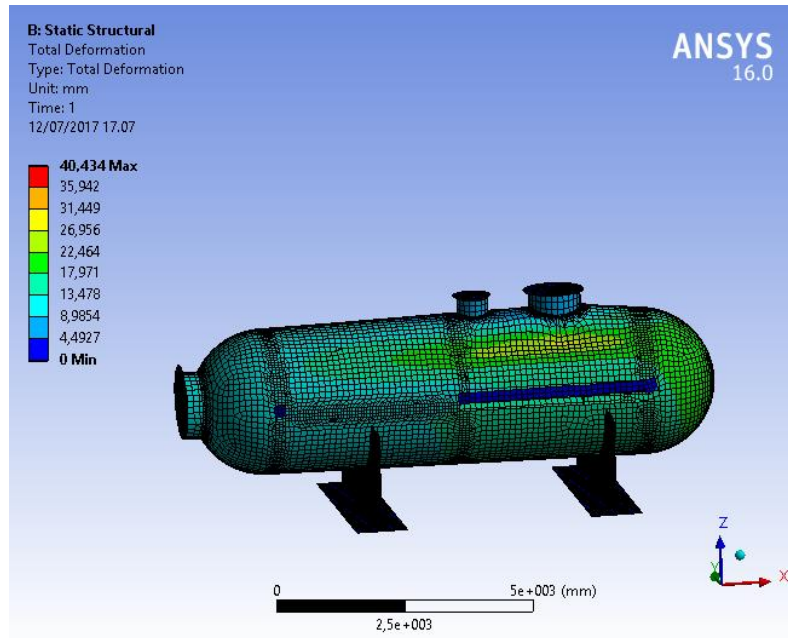
Tegangan sisa yang terjadi di daerah dekat area pengelasan merupakan tegangan tarik dan memiliki nilai tegangan terbesar. Sedangkan di titik yang berjarak semakin jauh dengan weldtoe maka nilainya akan semakin mendekati 0 (nol). Pada Gambar 4.9. *Pathline 2* dengan nilai tegangan sisa maksimal adalah sebesar 100,76 MPa.



Gambar 4.9. Tegangan yang terjadi pada struktur *pressure vessels* pada pathline 3

4.7 ANALISA TOTAL DEFORMASI

Dari hasil analisa deformasi didapatkan total deformasi terbesar berada pada ujung brace bagian atas. Sebagai contoh pada gambar berikut ini ditampilkan total deformasi pada Gambar 4.10.



Gambar 4.10. Total deformasi yang terjadi pada struktur

Dari gambar di atas distorsi yang terjadi yaitu sebesar 40,434 mm atau 4 cm. Nilai tersebut cukup besar dikarenakan ukuran model geometri yang digunakan juga besar.

1.6 ANALISA TEGANGAN SISA SETELAH *POST WELD HEAT TREATMENT*

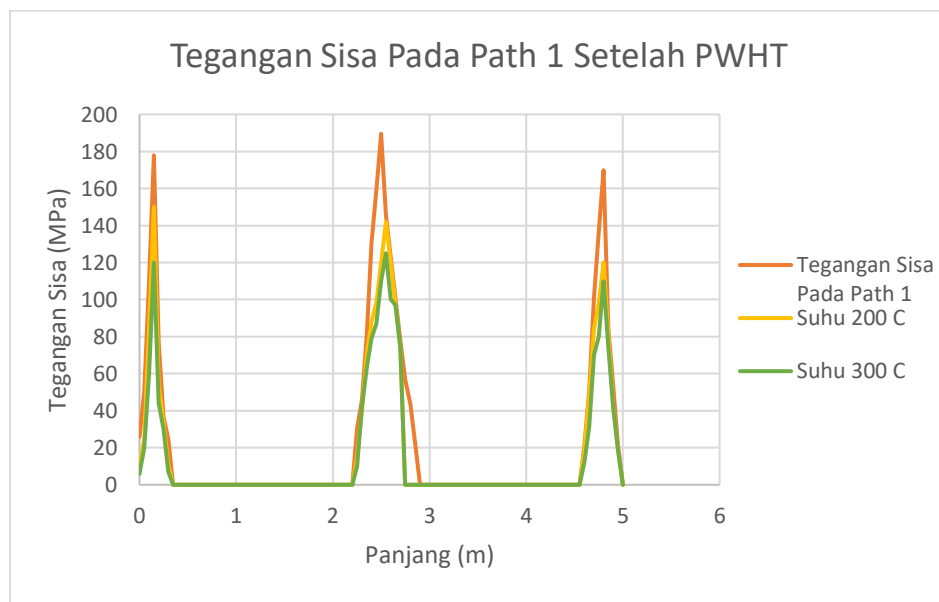
Simulasi *PWHT* ini dilakukan pada model dengan memberikan beban panas kembali sampai mencapai suhu tertentu dengan waktu tahan tertentu di daerah pengelasan. Dalam tugas akhir ini dilakukan 2 variasi *PWHT* seperti yang terinci pada Tabel 4.2 untuk melihat suhu dan waktu tahan yang membuat tegangan sisa berkurang banyak.

Tabel 4.2. Variasi Suhu dan Waktu Tahan Post Weld Heat Treatment

Suhu (C)	Waktu Tahan (jam)
200	4 jam
300	3 jam

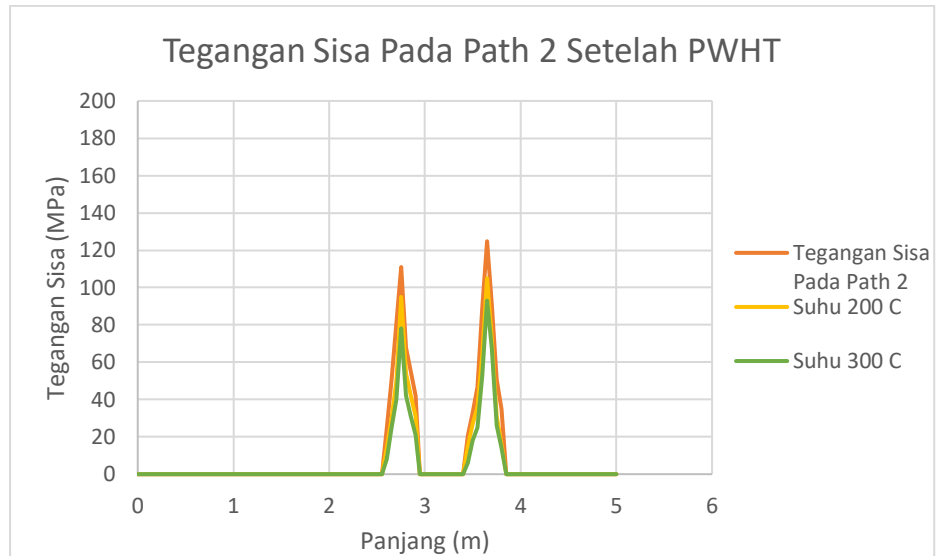
Untuk analisa tegangan sisa setelah *PWHT* akan ditinjau sesuai dengan pathline sebelum perlakuan *PWHT*. Tujuan dari *PWHT* adalah pengurangan tegangan sisa, sehingga analisa tegangan berfokus pada berkurangnya tegangan sisa. Berikut adalah grafik perbandingan tegangan sisa mulai dari pathline 1 sampai dengan pathline 3 pada Gambar 4.11, Gambar 4.14 dan Gambar 4.13.

1. Post Weld Heat Treatment Pada Pathline 1



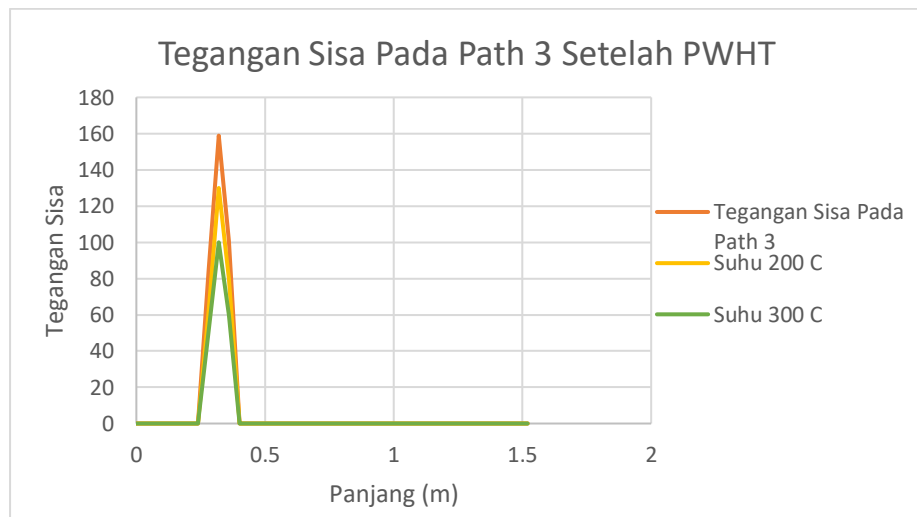
Gambar 4.11. Gambar Distribusi Grafik Perbandingan Tegangan Sisa Setelah PWHT Pada Pathline 1

2. Post Weld Heat Treatment Pada Pathline 2



Gambar 4.12. Gambar Distribusi Grafik Perbandingan Tegangan Sisa Setelah PWHT Pada Pathline 2

3. Post Weld Heat Treatment Pada Pathline 3



Gambar 4.13. Gambar Distribusi Grafik Perbandingan Tegangan Sisa Setelah PWHT Pada Pathline 3

Dari gambar 4.11. sampai 4.13 di atas terjadi penurunan yang cukup signifikan pada tegangan sisa maksimal. Hasil tegangan sisa maksimum pada masing-masing pathline sebelum perlakuan PWHT pada pengelasan struktur

pressure vessels adalah berturut-turut sebesar 189 MPa, 124,8 MPa, 100,76 MPa. Kemudian setelah diberi perlakuan post weld heat treatment, tegangan sisa maksimal tersebut menjadi turun sebesar 125 MPa, 93 Mpa, 100 MPa.

BAB V

PENUTUP

5.1 KESIMPULAN

Dari penelitian yang telah dilakukan, didapatkan nilai tegangan sisa dapat berkurang setelah diberi perlakuan PWHT. Berdasarkan analisis dan pembahasan yang dilakukan diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Hasil tegangan sisa maksimum dari pathline 1 hingga pathline 3 adalah sebesar 189 MPa, 124,8 MPa, 100,76 MPa. Sedangkan untuk distorsi maksimum adalah 40,3 mm. Sedangkan tegangan sisa yang terjadi yang paling kecil dari pathline 1 hingga pathline 5 adalah 15 MPa, 20 MPa, 17 MPa.
2. Setelah diberi perlakuan PWHT tegangan sisa terus turun seiring dengan kenaikan suhu. Pengurangan tegangan sisa maksimal terbesar terjadi pada pathline 1 hingga pathline 3 yaitu sebesar 125 MPa, 93 MPa, 100 MPa, dari tegangan sisa sebelum PWHT. Dari semua perlakuan *Post Weld Heat Treatment* maka semakin tinggi suhu PWHT pengurangan tegangan sisa maksimal akan semakin besar.

5.2 SARAN

Saran yang dapat diberikan untuk penelitian lebih lanjut mengenai Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Disarankan untuk menambahkan beban aksial dalam perhitungan pada sambungan tubular untuk mengetahui pengaruhnya terhadap tegangan sisa.
2. Menambah variasi suhu PWHT untuk mengetahui efek penambahan suhu PWHT pada perubahan tegangan sisa.
3. Disarankan menambah jumlah potongan model pengelasan pada setiap titik pengelasan

DAFTAR PUSTAKA

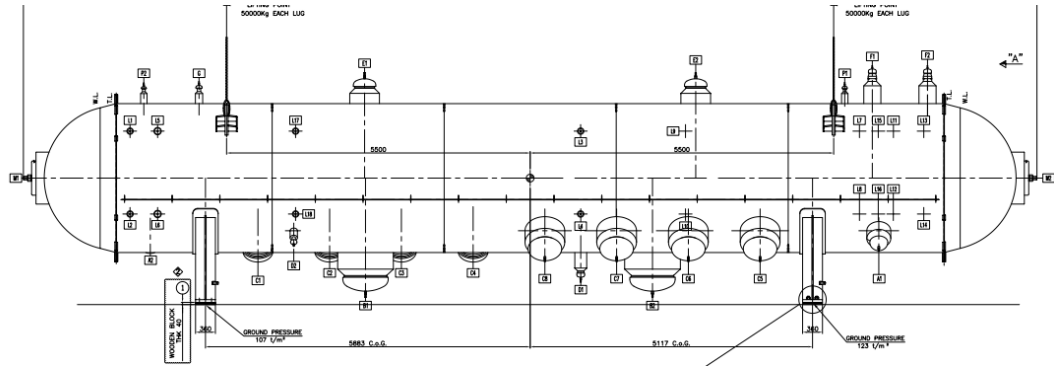
ASME IX. 2013. *Boiler and Pressure Vessel Code "Welding, Brazing, and Fusing Qualifications"*. The American Society of Mechanical Engineers : New York.

- ASME IIC. 2013. *Boiler and Pressure Vessel Code “Specifications for Welding Rods, Electrodes, and Filler Metals”*. The American Society of Mechanical Engineers : New York.
- AWS D1.1. 2003. *Structural Welding Code – Steel*. American National Standards Institute : USA.
- Akbar, Taufik. Santosa, Budie. 2012. *Analisa Pengaruh dari Welding Sequence Terhadap Tegangan Sisa dan Deformasi Pada Circular Patch Weld Double Bevel Butt-Joint Plat ASTM A36 Menggunakan Metode Element Hingga*. ITS Surabaya.
- Alip. 1989. *Panduan Pengajar Buku Teori dan Praktek Las*. Proyek Pengembangan Lembaga Tenaga Kependidikan : Jakarta
- Firdiansyah, Bambang. 2011. *Panas Distribusi, Deformasi dan Analisa Tegangan Sisa Las Aluminium Plate dengan Dua Profil Sudut Kanan dengan Metode Elemen Hingga*. ITS Surabaya
- Hastuti, Farida. 2010. *Analisa Pengaruh Pengelasan FCAW pada Sambungan Material Grade A dengan Material Grade DH 36*. Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan, FTK, ITS, Surabaya.
- Mubarok, Husni. 2010. *Pengaruh Komposisi Gas Argon dengan Gas CO2 pada Pengelasan GMAW Terhadap Material Stainless Steel*. ITS Surabaya.
- Pambudi, Agung. 2008. *Analisa Pengaruh Variasi Pengelasan Dua Sisi Material AH 36 Terhadap Distribusi Panas, Deformasi, dan Tegangan Sisa Pada Pengelasan Filet Joint*. Tugas Akhir Jurusan Teknik Perkapalan, FTK ITS, Surabaya.
- PT. Petrokimia Gresik. *Data Struktur Pressure Vessels PT. Petrokimia Gresik*: Gresik.
- Suharto. 1991. *Teknologi Pengelasan Logam*. Rineka Cipta : Jakarta
- Wirjosumarto, Harsono., Okumura, Toshie. 1996. *Teknologi Pengelasan Logam*. PT Pradnya Paramita : Jakarta.
- Yuni Setyawati, Sri. 2010. *Analisa Pengaruh Tegangan Sisa dan Distorsi pada Pengelasan Butt Joint dan T-Joint Dengan Variasi*

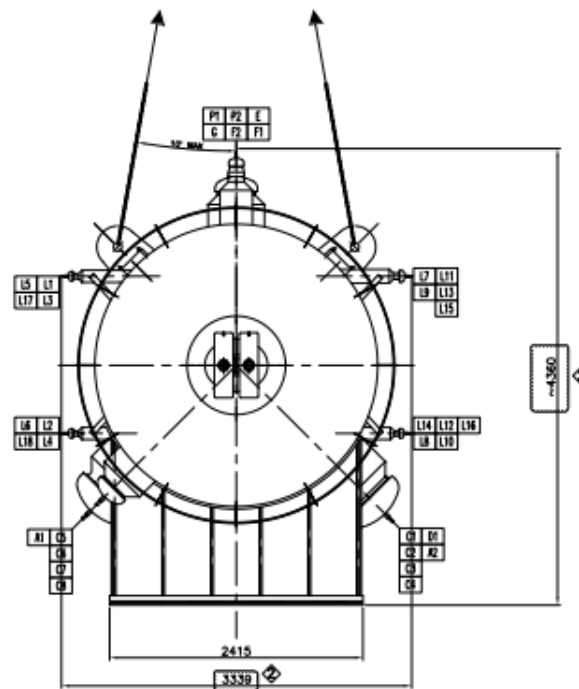
Tebal Plat. Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan, FTK, ITS, Surabaya.

Utomo, Septian Fajar. 2016 ***Analisa pengaruh post Weld Heat Trearment Terhadap Tegangan Sisa dan Distorsi ada Sambungan Tubular Multiplanar Tipe-K dengan Menggunakan Finite Element Method.*** Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan, FTK, ITS, Surabaya.

LAMPIRAN A
DATA-DATA YANG DIGUNAKAN DALAM
PENGERJAAN TUGAS AKHIR



Material	Al-6061-T6
Outer Diameter	2380 mm
Inner Diameter	2086 mm
Total Length	8100 mm
Cap Thickness	304,8 mm



DATA WELDING PROCEDURE SPECIFICATIONS (WPS)



pt. gearindo prakarsa
CONSTRUCTION, ELECTRICAL, MECHANICAL

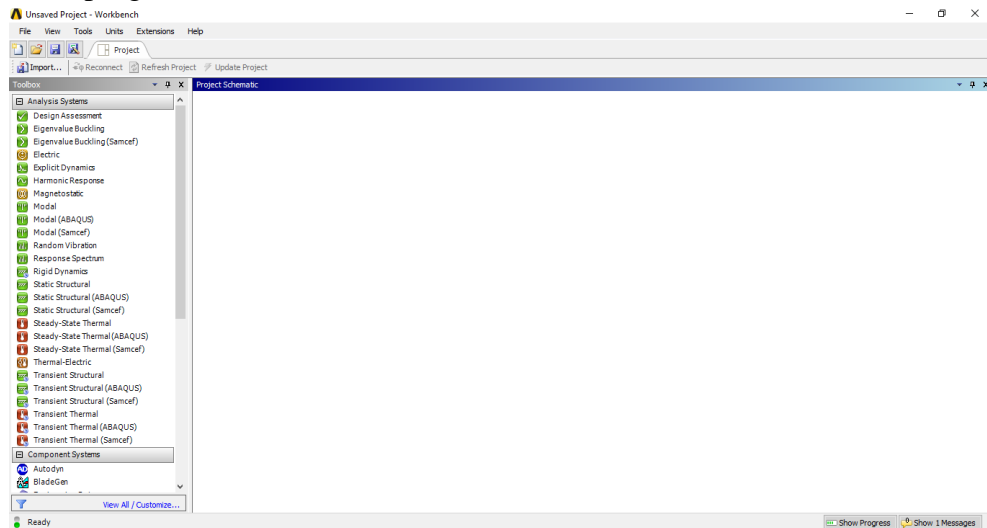
WELDING PROCEDURE SPECIFICATION				
Section IX Edition 2004 , ASME Boiler and Pressure Vessel Code				
Welding Procedure Specification No:	23/WPS/GP/ASME/07	Revision No.:	0	
Welding Process(es):	GTAW + SMAW	Type:	Manual	
Supporting PQR No (s)	23/PQR/GP/ASME/07			
Date: 8-August-2007				
JOINTS (QW-402)				
Joint Design	Single Vee (refer to page 3 for other joint detail range)	Backing	No or Yes	
Backing Material (Type)	Base metal or weld metal	Retainer	None	
Joint Detail:				
Base Metal (QW-403)				
P-No.	1	Group No.	1	
Mat'l Specification Range	-			
OR				
Thickness range				
Base Metal	Groove, mm	1.6 - 38.1 mm	Fillet, mm	all
Base Metal (Charpy)	Groove, mm	16 - 38.1 mm	Fillet, mm	not restricted
Pipe Diameter Range:	Groove, mm	not restricted	Fillet, mm	not restricted
Other	-			
Filler Metals (QW-404)				
Spec. No. (SFA)	GTAW	5.18	SMAW	5.5
AWS No. (Class)	ER70S-6		E7018-1	
F-No./ A-No.	6		4	
Filler metal Ø, mm	2.4		2.5, 3.2	
Weld metal deposit, Groove, mm	3.0		16.05	
Weld metal thickness range, Groove, mm	6.0		32.10	
Fillet, mm	All		All	
GTAW, Filler metal product form	-			none
For SAW, Flux class	N/A	Alloy element	N/A	
Flux trade name	N/A	Flux type	N/A	
Alloy flux	N/A	Recrushed slag	N/A	
Suppl. filler metal	N/A			
Other	Electrode Brand : KOBE , ESAB or Equivalent			

LAMPIRAN B
PROSES Pengerjaan Analisa Thermal
Dengan *Software* ANSYS WORKBENCH 16.2
(TRANSIENT THERMAL)

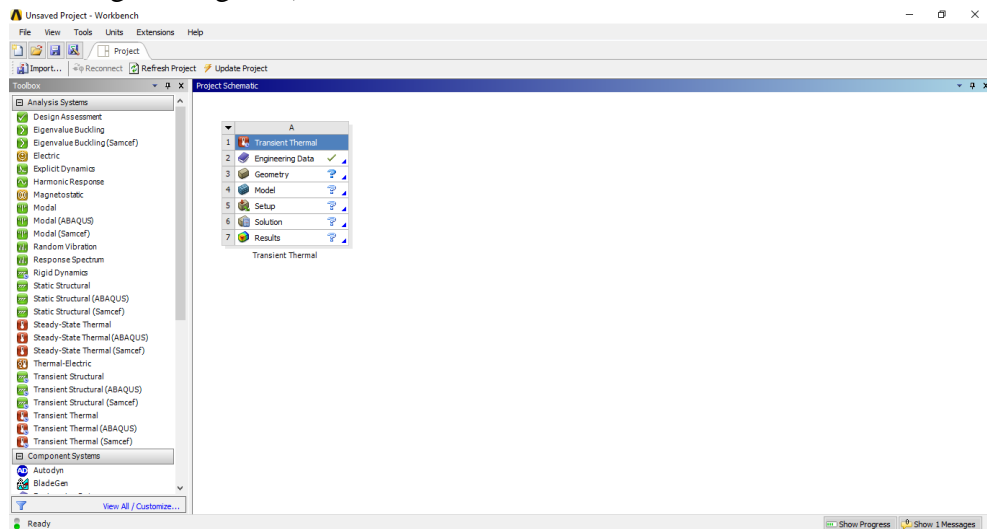
LAMPIRAN B

PROSES Pengerjaan Analisa Thermal

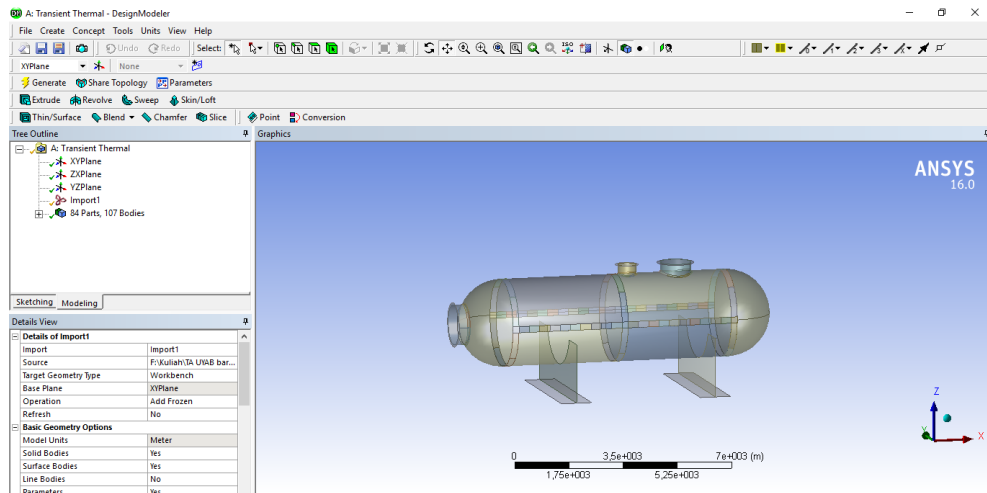
1. Buka program ANSYS WORKBENCH 16.0



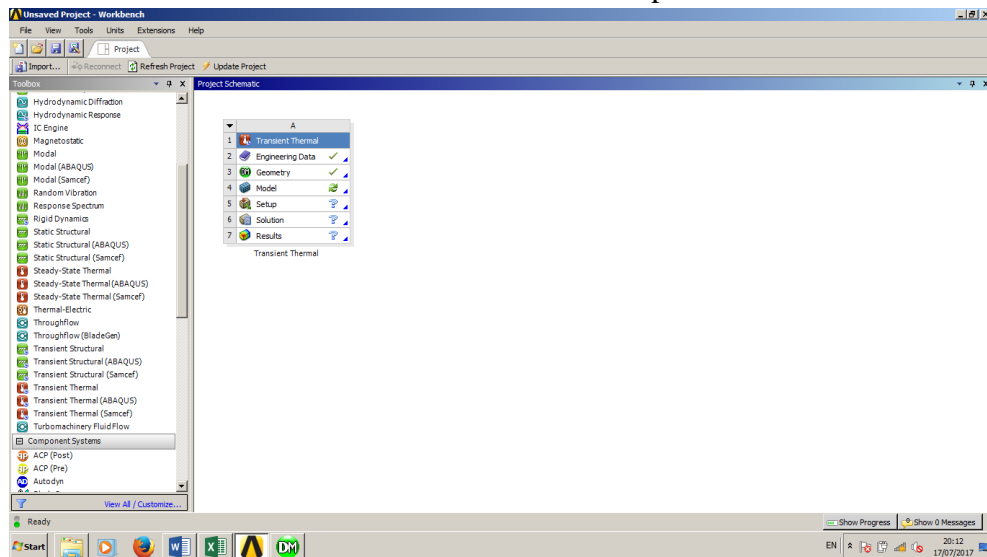
2. Double click pada transient thermal (Jika ingin mengganti material propertis buka engineering data)



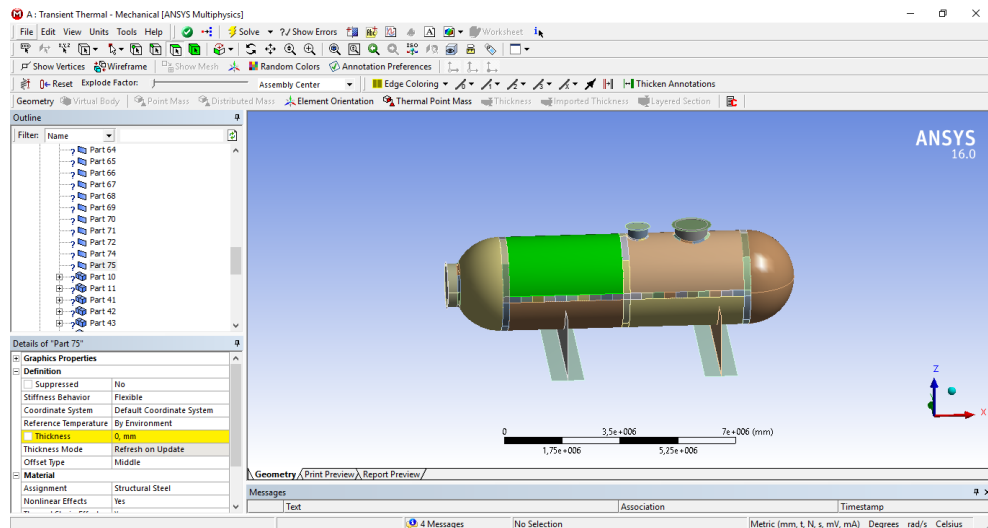
3. Buka Geomety pada Project Schematic → import external geometry file →
Lalu click generate



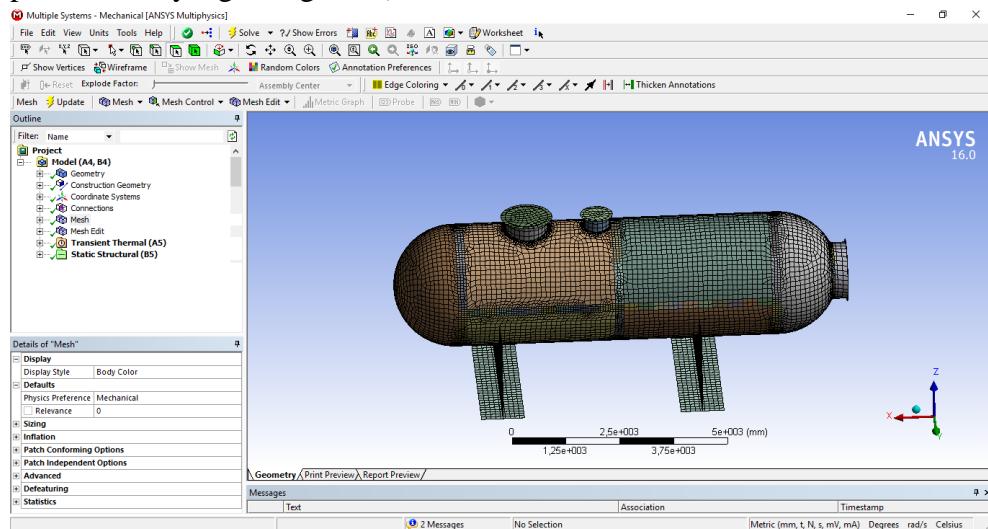
4. Setelah selesai degenerate, kembali pada jendela utama ANSYS WORKBENCH 16.0. Akan muncul tanda refresh pada Model



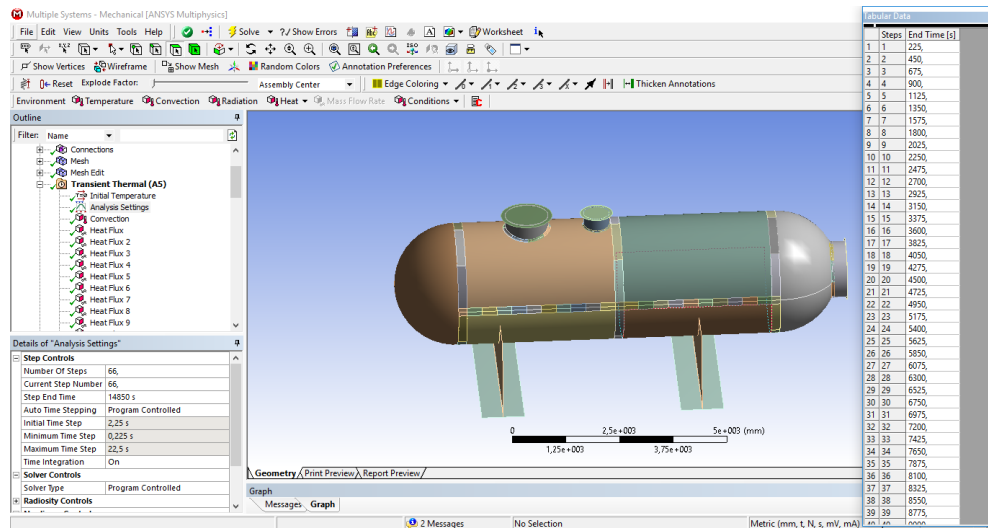
- Click Model → lalu masuk pada Geometri dalam Multiple systems → Masukkan ketebalan pada Definition setiap Part



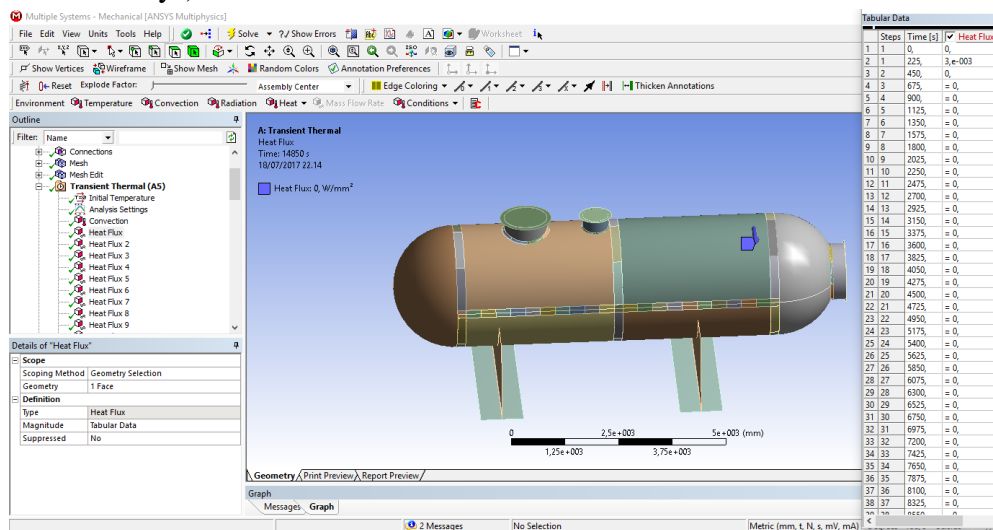
- Click kanan pada mesh → lalu click Sizing (untuk menentukan besaran mesh pada daerah yang di inginkan)

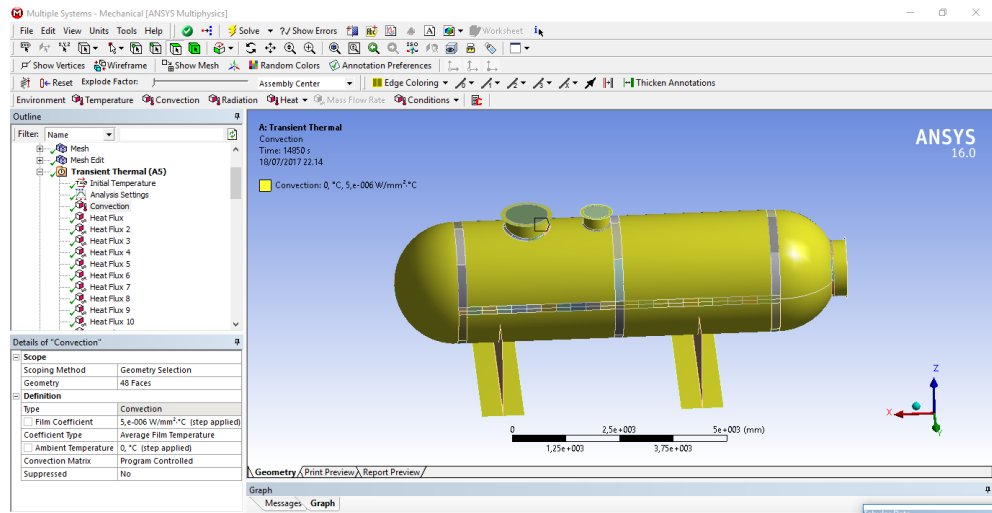


7. Lalu pada Transient Thermal pilih Analysis Settings → masukkan Step dan waktu yang dibutuhkan untuk setiap Step

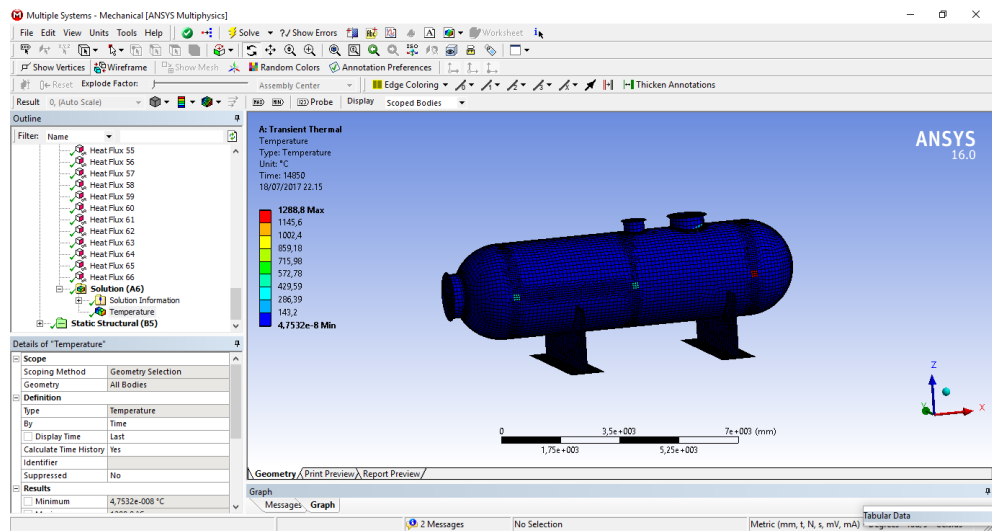


8. Setelah Step-Step sudah dimasukkan lalu masukkan beban heat fulx untuk setiap load step. Dan masukkan Convection dengan pemilihan geometry selain daerah pengelasan. (Convection dilakukan dengan mengimport data dari ansys) → setelah semua dilakukan kemudian click Solve





9. Setelah hasil running keluar maka akan didapatkan suhu maksimum di setiap daerah pengelasan dari tubular data. Lalu transfer solution kedalam static structural.

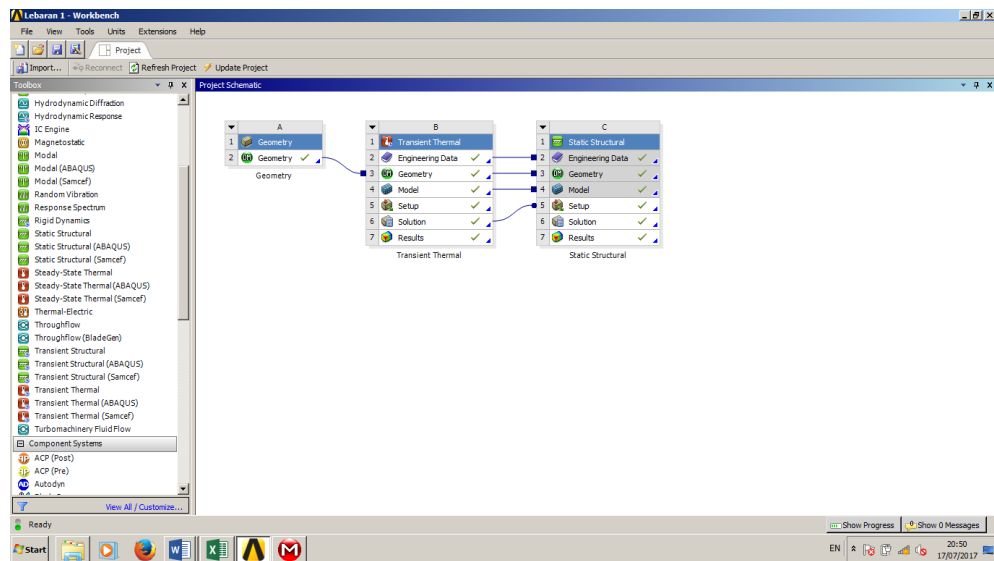


LAMPIRAN C
PROSES Pengerjaan Analisa Struktural
Dengan *SOFTWARE* ANSYS WORKBENCH 16.2
(STATIC STRUKTURAL)

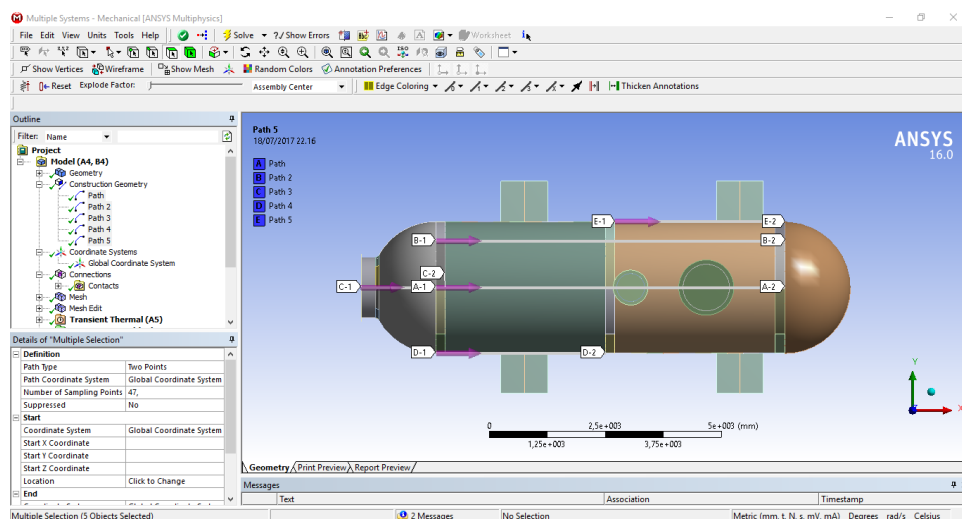
LAMPIRAN C

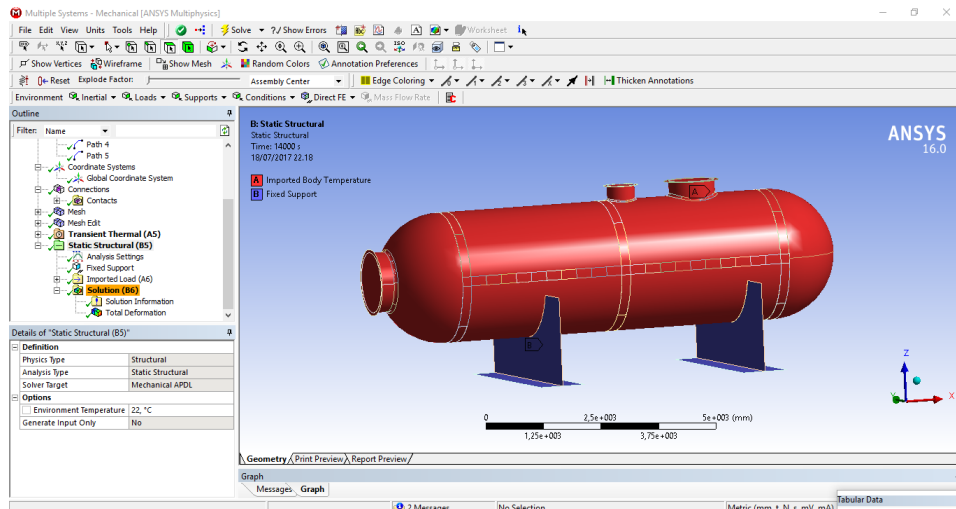
PROSES MENGUBAH BEBAN THERMAL MENJADI REGANGAN STRUKTURAL YANG MENAKIBATKAN TERJADINYA TEGANGAN SISA

1. Pada jendela utama ANSYS WORKBENCH 16.2. pilih setup pada static structural. Lalu pada geometri click kanan → pilih Construction geometri (untuk membuat path)
 Pada Construction geometri pilih path → pilih 2 (dua) titik sebagai patokan dari satu path pada geometry.

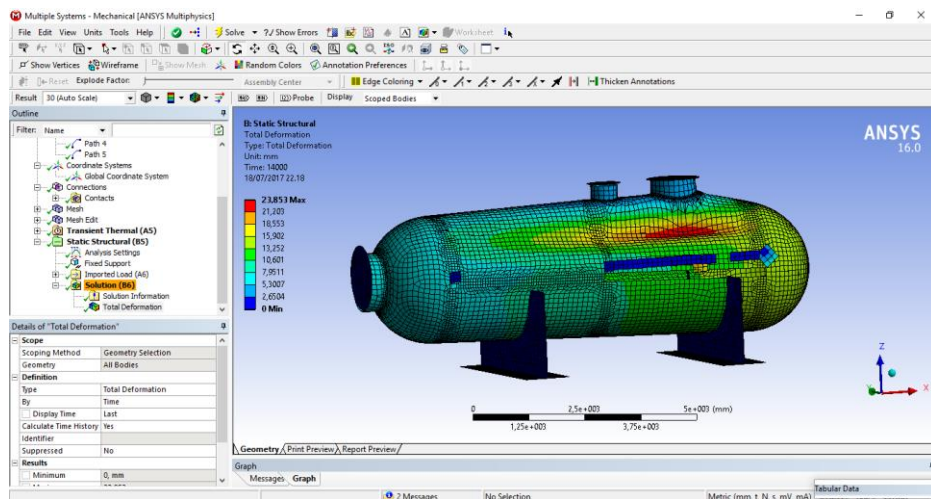


2. Pada static Struktural pilih support untuk boundary conditionnya sesuai dengan kondisi model sebenarnya.





3. Lalu pada Solution pilih total deformation dan equivalent stress untuk mendapatkan tegangan sisa dan distorsi maksimum.



4. Setelah itu dari hasil-hasil yang sudah didapat dimasukkan dalam laporan.

BIODATA PENULIS

BIODATA PENULIS



Bayu Iman Fatkurokhim lahir di Surabaya pada tanggal 21 Maret 1995, merupakan anak kedua dari tiga bersaudara. Penulis telah menyelesaikan pendidikan formal di SDN Kalisari 1 Surabaya, SMP Negeri 6 Surabaya, dan SMA Negeri 9 Surabaya. Setelah lulus pada tahun 2013, penulis mengikuti program Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri dan diterima di jurusan Teknik Kelautan FTK – ITS dan terdaftar dengan NRP. 4313100090. Selain kesibukan dalam kuliah penulis juga ikut serta dalam Himpunan Mahasiswa Teknik Kelautan sebagai Staff Ahli Departemen Dalam Neeri pada periode 2015-2016 dan Anggota Ocean Underwater Robotics ITS pada periode 2015-2016. Pada bulan Juli hingga September 2016, penulis berkesempatan Kerja Praktek dipt. Gearindo Prakarsa, dimana penulis memperoleh banyak pengetahuan tentang dunia *oil and gas*. Dalam tugas akhir ini penulis mengambil bidang struktur, dengan kajian mengenai Analisa Pengaruh Tegangan Sisa dan Perubahan Distorsi Pada Pengelasan Struktur Pressure Vessels PT. Petrokimia Gresik dengan Variasi Welding Sequence dengan Menggunakan Metode Elemen Hingga.

Kontak Penulis

Email : bayufatkurokhim@gmail.com

No. HP : 081234536823